



Universidad
Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Influencia de la viscosidad y de parámetros
geométricos en atomizadores Venturi-Vórtice.

Autor/es

Héctor Beltrán Larred

Director/es y/o ponente

Juan Antonio García Rodríguez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2014

RESUMEN

Ante la demanda de obtener gotas micrónicas para transporte neumático se persigue el diseño de un cabezal nebulizador con el cual dar solución a diversos problemas de lubricación en distintos ámbitos de la industria. La Universidad de Zaragoza a partir de estudios solicitados por empresas ajenas a la misma pretende continuar este estudio ampliándolo con propósito de seguir ganando conocimiento sobre el funcionamiento de los dispositivos atomizadores.

En concreto, se diseñó un dispositivo atomizador asistido por aire que denominaremos Venturi-Vórtice pues combina la generación de un vórtice de aire con el aprovechamiento de la depresión que genera para la absorción del líquido. En comparación con otros dispositivos asistidos por gas presenta la ventaja de que no precisa de orificios estrechos, por lo que se evitan posibles problemas de obturación y, además, se facilita el movimiento de líquidos viscosos. Una de las características más prometedoras de este tipo de atomizador es que ofrece la posibilidad de atomizar líquidos viscosos obteniéndose una fracción significativa de gotas con diámetro por debajo de los 5 micrómetros con presiones moderadas en la alimentación del gas, en torno a 3 bares.

El objetivo dentro del desarrollo del cabezal nebulizador es estudiar el funcionamiento de la última versión desarrollada de este con diferentes mezclas de agua y glicerina para comprender la influencia de la viscosidad en el prototipo, además de diferentes parámetros geométricos sobre la cabeza nebulizadora.

El ideal, que se mantiene en el estudio actual de la cabeza nebulizadora, y que se ha utilizado otros años consistirá en el ensayo reiterado de diferentes configuraciones propuestas y la elección de entre las mismas a la que mejores resultados proporcione. Los resultados se clasificarán con medidas de caudal nebulizado de mezcla, caudal de aire comprimido utilizado, la presión del aire así como diferentes eficiencias.

En referencia a los resultados del mismo, ya que aún no se había probado con líquidos de viscosidades mayores a los aceites SAE, es positivo, ya que nebuliza mezclas de una viscosidad aceptablemente alta, tal como la glicerina pura.

Por último, añadir que el proyecto ha sido realizado por el Área de Mecánica de fluidos de la Universidad de Zaragoza utilizando las instalaciones del Laboratorio de Investigación en Tecnologías de la Combustión (LIFTEC), situado a escasos metros de la EINA (Escuela de Ingeniería y Arquitectura).

MEMORIA

Tabla de contenido

INTRODUCCION	1
Contexto	1
Objetivos y alcance del proyecto.....	1
Información previa, clasificación de nebulizadores.....	1
Antecedentes	12
Funcionamiento del cabezal nebulizador.....	12
DESCRIPCION EXPERIMENTAL	13
Descripción de la instalación	13
Circuito de aire.....	14
Circuito de alimentación de fluido a nebulizar.....	16
Cabezal nebulizador	17
Caracterización de aerosoles: Fundamentos teóricos.....	17
Medidas de distribución de tamaño de gotas	19
Esquema general de la instalación.....	21
ENSAYOS	22
Variación de presión	22
Ensayos con agua	24
Ensayos con glicerina.....	29
Ensayos con mezclas	32
Desarrollo de mezclas	36
ESTUDIOS COMPARATIVOS.....	38
CONCLUSIONES	43
Trabajos futuros	43
BIBLIOGRAFIA	44
INDICES.....	46
Índice de ilustraciones	46
Índice de tablas	48

INTRODUCCIÓN

Contexto:

Anteriormente, los precursores del presente proyecto empezaron a trabajar en un modelo en respuesta a petición de una empresa fabricante de equipos y sistemas de lubricación centralizados. Las especificaciones de la empresa se cubrieron con el predecesor de este proyecto y este ya cumplió su cometido, pero los profesores del Área de Mecánica de Fluidos seguían interesados en el modelo desarrollado por la universidad y en conocer las características del dispositivo así como las posibilidades que ofrece para la atomización de líquidos muy viscosos y con comportamientos reológicos complejos. De esta manera se continúa con el desarrollo del mismo, estudiando el comportamiento de este para mezclas de mayores viscosidades y para la nebulización de glicerina pura.

Objetivos y alcance del proyecto:

El principal objetivo del presente proyecto es el estudio del comportamiento del modelo de nebulizador desarrollado al final del proyecto precedente. Tanto el comportamiento del mismo en el suministro a presión constante como la alimentación del dispositivo desde un depósito por encima de este.

Información previa:

La tecnología de la nebulización se presenta en una amplia serie de dispositivos para las distintas aplicaciones, en el mercado, ya sea para acondicionamiento, medicina o usos industriales. Los nebulizadores presentes en el mercado presentan una generación de tamaños de gota desde los 0,001 a los 100 μm . El proceso de nebulización es por el cual se transforma el líquido en aerosol.

La tecnología de la nebulización abarca diferentes tecnologías para producir la niebla dependiendo en la energía utilizada para romper la tensión superficial del líquido. El uso de esta energía se emplea para “romper” el líquido neutralizando la tensión superficial que mantiene al mismo unido y no en forma de aerosol, formando una mezcla homogénea del líquido en el gas.

Se presenta pues una tabla con una clasificación de los nebulizadores en función de la fuente de energía de la que se alimentan los mismos:

Tipo de nebulizador	Energía utilizada
Neumático	Cinética
Ultrasónico	Ultrasonidos
Hidráulico	Hidráulica
Térmico	Calorífica
Electrostático	Eléctrica

Tabla 1 Distintos tipos de nebulizadores dependiendo de la procedencia de la energía

Los aspectos que interesan modificar de los nebulizadores para mejorar las prestaciones de los mismos se resumen en minimizar el tamaño de gota para una cantidad dada de líquido a nebulizar, o lo que es lo mismo, maximizar la eficiencia de la rotura del líquido en gotas. La situación ideal del mismo sería que toda la energía disponible se utilizara en vencer la tensión superficial hasta la descomposición de la muestra en el tamaño de partícula deseado. También, en muchas ocasiones, interesa que la velocidad de las gotas formadas sea lo más uniforme posible así como su tamaño. Es importante también poder ampliar la gama de líquidos que se pueden atomizar, por ello es interesante conseguir la atomización de líquidos con alta viscosidad y/o tensión superficial. Finalmente el dispositivo ha de tener un comportamiento similar independientemente de la naturaleza del fluido a nebulizar, la robustez, la sencillez y el coste del mismo. Basándonos en esto, haremos un recorrido sobre los nebulizadores actualmente comercializados.

Nebulización neumática

La tecnología de nebulización más extendida; así como la más sencilla, con coste moderado y suficiente robustez; es la nebulización neumática o de dos fluidos. Los aerosoles que se generan mediante esta variante tienen como fuente de energía una corriente gaseosa a alta velocidad, cuyo momento lineal romperá la tensión superficial del líquido.

La formación del aerosol tiene lugar en dos etapas diferentes, primero la superficie líquida se ve influenciada por la corriente gaseosa formando ondulaciones en la misma, en un primer proceso de intercambio de energía. Una vez formadas las ondulaciones es más sencillo el intercambio de energía entre fluidos de modo que el líquido se acelere de igual manera. A medida que el líquido aumenta su velocidad y las ondas formadas por el gas aumentan su tamaño y velocidad, la tensión superficial, la cual mantiene el líquido unido empieza a tener menos importancia en la estabilidad del flujo del mismo. El proceso de intercambio de energía entre fluidos sigue hasta que la estabilidad del flujo se rompe creando el aerosol y una vez formado el mismo, las gotas de líquido son arrastradas por la corriente gaseosa. Para que una corriente de gas sea capaz de romper la estabilidad de un líquido hay una velocidad relativa mínima entre el gas y el líquido a partir de la cual es posible la nebulización del líquido.

El funcionamiento de este tipo de nebulizadores con líquidos de viscosidad apreciable será más complicado debido al efecto estabilizante de la viscosidad. Como consecuencia de esto, a una determinada velocidad de aire, mayor será el tamaño de las gotas cuanto mayor sea la viscosidad del líquido.

Si consultamos la bibliografía podremos obtener que la longitud de onda de máxima inestabilidad es a partir de la cual para un determinado líquido sufre la rotura del flujo para dar paso a las gotas arrastradas por el aire. Definida por la siguiente expresión, para nebulizadores neumáticos:

$$\lambda_{max} = 2\pi a \sqrt{2} \left(1 + \frac{\eta_l^2}{8\rho_l a \gamma} \right)^{1/2}$$

Donde η_l representa la viscosidad del líquido a nebulizar, γ la tensión superficial, ρ_l la densidad del líquido y r_l al radio de la vena líquida

Longitudes de ondas por debajo de ésta no presentaran fractura de la tensión superficial. Es por tanto que nuestro interés sea minimizar la longitud de onda de máxima inestabilidad, de forma que el tamaño de gota disminuya. Si tratamos con líquidos viscosos, se debe maximizar la tensión superficial, el radio de la vena líquida y la densidad, puesto que se encuentran en el denominador del termino fraccionario de la formula y disminuirá el impacto de la viscosidad presente en el numerador.

Llegamos a la conclusión pues de que los factores que afectan al buen funcionamiento de un nebulizador neumático son:

- La velocidad relativa de los fluidos en juego.
- El tipo y las propiedades del gas utilizado para la nebulización.
- Propiedades físicas del líquido a nebulizar, viscosidad, tensión superficial y densidad.
- La geometría, forma y dimensiones del nebulizador, ya que dispondrán el diámetro de vena líquida, junto con la presión aplicada definirán la velocidad de la corriente líquida y gaseosa.

Una vez determinado el funcionamiento básico de los nebulizadores neumáticos, se puede hacer una distinción entre las diferentes técnicas para poner en contacto las corrientes líquidas y gaseosa, que junto al tamaño del mismo determinará las características de éste.

Nebulizador neumático concéntrico

Como su nombre sugiere, este dispondrá de la corriente de gas en el mismo eje que la corriente de líquido y se mezclaran a la salida del mismo dando lugar a la rotura de este.

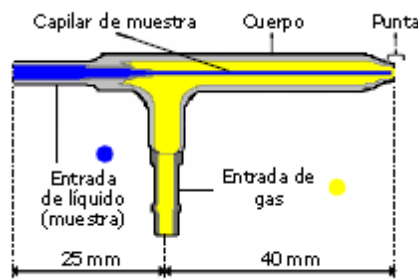


Ilustración 1 - Esquema de un nebulizador neumático concéntrico convencional.

El funcionamiento del mismo se basa en el efecto Venturi, que se da en la punta de salida del nebulizador, al hacer pasar aire a una velocidad alta se crea una depresión en la misma lo que absorbe liquido del capilar presente, por lo que no es necesario que el líquido se bombee.

Pueden estar fabricados de vidrio o cuarzo de una sola pieza o en diferentes segmentos. Existen variantes de diseño y tamaño en función de la finalidad o el líquido utilizado en los mismos. Suelen presentar problemas de obturación por los diámetros de salida tanto de líquido como de gas.

Nebulizador neumático de alta presión (Single-Bone High-Pressure Pneumatic Nebulizer, SBHPPN)

Genera una distribución radios de gota menor que el concéntrico, ya que tiene un mayor intercambio de energía entre la corriente gaseosa y la líquida al comenzar el contacto antes de la boquilla de salida. A su vez el líquido se administra con una orientación descendente, lo que proporcionara una velocidad mayor debido a la contribución de la gravedad. Sin embargo se precisan altas presiones de trabajo para el correcto funcionamiento de este, lo que aumenta el coste del mismo y aumenta los riesgos en funcionamiento.

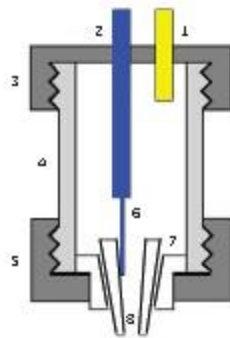


Ilustración 2 - Esquema de un nebulizador neumático de alta presión. Los números hacen referencia a: 1. Tubo de entrada de gas, 2. tubo de aporte de la muestra, 3. Rosca metálica superior, 4. Cuerpo metálico central, 5. Rosca metálica inferior, 6. Capilar de plástico, 7. Pieza de teflón, 8. Boquilla de vidrio

Nebulizador neumático de flujo cruzado

El proceso a través del cual se ponen en contacto las dos corrientes de fluido es mediante dos capilares enfocados en flujo cruzado de manera que el líquido que va expulsando la corriente del mismo lo arrastra la corriente de aire a gran velocidad. La forma en la que la muestra es nebulizada es por el choque forzado de las dos corrientes y por consiguiente la formación de diámetros de gota es muy dispersa, ya que el proceso de choque es muy caótico. El comportamiento en general de este tipo de nebulizadores es más bien negativo, ya que como se ha dicho, presenta una distribución de tamaños dispersa, además de la complejidad de la utilización del mismo. Se ha intentado evolucionar el diseño de diversas maneras pero no se ha

alcanzado un modelo el cual tenga un comportamiento adecuado. Se puede concretar que la única ventaja que presenta es que se puede construir con un amplio abanico de materiales y la tolerancia a disoluciones salinas y su robustez.

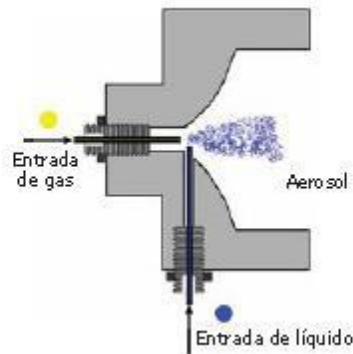


Ilustración 3 - Esquema de un nebulizador neumático de flujo cruzado.

Nebulizador neumático Anti-bloqueo o Babington.

Este tipo de nebulizador tiene una gran versatilidad en lo que concierne a líquidos de viscosidad elevada, con partículas suspendidas o disueltas, o tensión superficial. Este se compone de una esfera de vidrio con orificios a lo largo de una circunferencia horizontal en la misma por los cuales sale el gas desde el interior de la misma. El líquido se vierte por encima de la misma haciendo que por acción de la gravedad descienda hacia los orificios por los que sale aire. Cuando alcanza estos orificios, las corrientes de fluidos interaccionan en flujo cruzado donde se produce la nebulización. Podemos nebulizar líquidos de cualquier naturaleza, pero la disposición de los mismos también hace que se deseche una gran proporción de este, por lo que se precisan grandes muestras para el estudio del mismo.

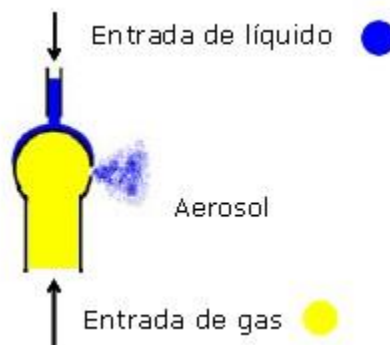


Ilustración 4 - Esquema de un nebulizador neumático Babington.

Nebulizador neumático de surco de V (V-Groove)

Una versión mejorada del anterior nebulizador, ya que el método de introducción de la corriente líquida es muy similar, aunque se mejora la característica por la cual una gran parte de la muestra se desechaba, en este nebulizador la muestra líquida es conducida hacia la salida de aire. El funcionamiento de nebulización es esencialmente el mismo que en el nebulizador de Babington, pero en vez de verter el líquido en la esfera, en este se vierte por un surco el cual desemboca en el orificio de salida del aire, en este punto es donde se produce la nebulización al arrastrar el aire al líquido y romperlo como repercusión del intercambio de momento lineal. Presenta poco riesgo de bloqueo y se puede producir en diferentes materiales. Principalmente es utilizado para el análisis de suspensiones biológicas.

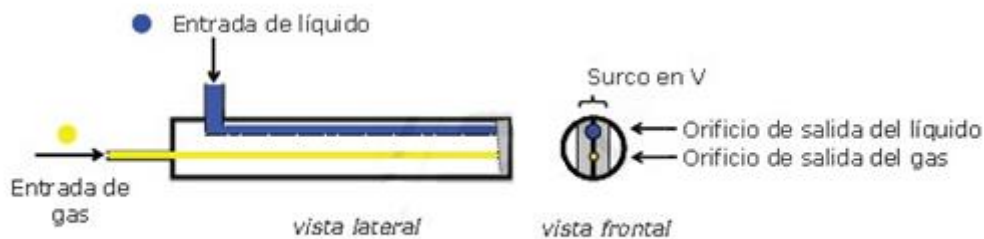


Ilustración 5 - Esquema de un nebulizador neumático de surco V.

Nebulizador neumático cónico (Conespray)

También considerado de tipo Babington, puesto que el funcionamiento es similar a este y al de surco en V. Se diferencian en que el líquido interactúa con la salida de gas en distintas geometrías y como resultado presenta una mayor efectividad con una cantidad de muestra menor que su antecesor, aunque sigue siendo considerable comparado con los nebulizadores de flujo cruzado. Sigue presentando los mismos inconvenientes que el nebulizador de surco en V o el de Babington. Con el objetivo de disminuir la presión de alimentación de gas se han comercializado diferentes variantes capaces de nebulizar líquidos con alto contenido salino y de suspensiones.

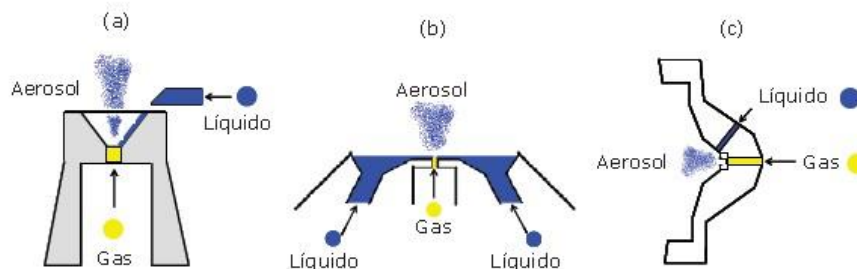


Ilustración 6 - Esquema de un nebulizador neumático cónico de tipo: (a) Cónico de Sharp, (b) Cónico lineal, (c) Cónico de Perkin Elmer.

Nebulizador neumático de vidrio fritado (Glass-frit nebulizers)

Este nebulizador utiliza el mismo método para producir el aerosol que los anteriores pero de una forma más eficiente para los intereses de la nebulización. Esto se consigue al pasar de un solo orificio a una superficie de orificios creada por un vidrio fritado, ya que de esta manera el líquido se repartirá entre todos los orificios y el flujo de aire se distribuirá de igual manera. El líquido se vierte en la placa de vidrio fritado y el gas se hace circular de abajo hacia arriba para que se produzca un flujo a contracorriente y el gas arrastre el líquido a la vez que lo nebuliza. Al aumentar la superficie de intercambio de energía aumenta considerablemente la eficiencia del mismo, alcanzando con una mínima cantidad de muestra eficacias superiores al 90%, pudiendo ser utilizado como micronebulizador. Sin embargo no es recomendable para nebulizar soluciones salinas o de elevada tensión superficial ya que podría presentar problemas de obstrucción en el vidrio fritado. Sin embargo tiene altos tiempos de estabilización y efectos de memoria.

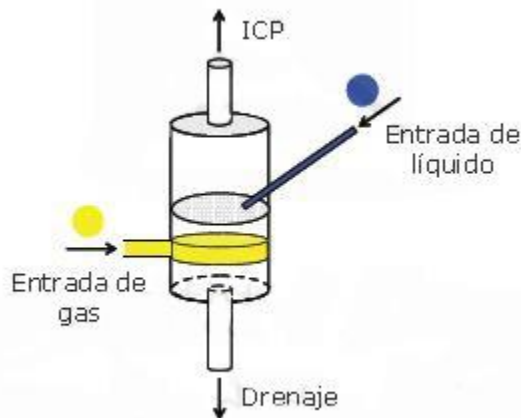


Ilustración 7 - Esquema de un nebulizador neumático de vidrio fritado.

Nebulizador neumático de rejilla (Hildebrand nebulizer)

Se trata de un híbrido entre el nebulizador de Babington y el de vidrio fritado. El flujo de líquido se deposita en una rejilla para que el flujo de aire lo arrastre y lo rompa, pero a diferencia del video fritado el flujo es cruzado. Una segunda placa se dispone a continuación de la primera con el objetivo de romper las gotas más grandes y reducir los pulsos. Con esta segunda placa se reducen también los efectos de memoria y los problemas de estabilidad aunque también presenta problemas de obturación.

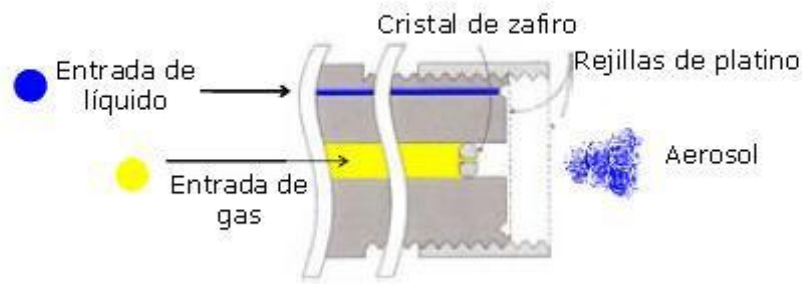


Ilustración 8- Esquema de un nebulizador neumático de rejilla.

Nebulizador neumático de flujo paralelo mejorado o Burgener.

Este nebulizador, procedente del nebulizador de flujo paralelo original que se diferencian en la relación de apertura de la boquilla al final del nebulizador, es uno de los más comercializados. Como podemos observar en la figura, las dos corrientes se ponen en contacto paralelamente, sin llegar a cruzarlas ni a ponerlas a contracorriente, haciendo que los esfuerzos tangenciales provoquen las ondulaciones necesarias para romper el flujo líquido en un aerosol. Dependiendo de la geometría de la interacción y de la velocidad del gas se pueden llegar a producir aerosoles con diámetros de gota muy fina y de alta calidad.

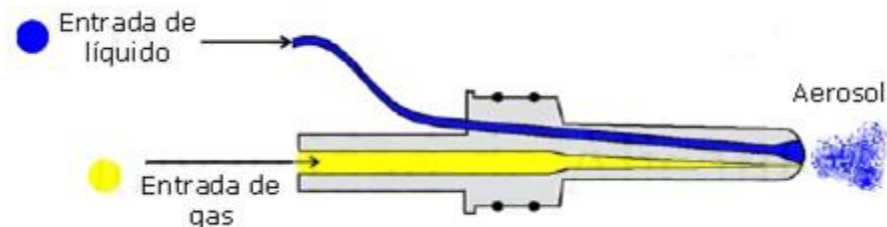


Ilustración 9 - Esquema de un nebulizador neumático de Flujo paralelo mejorado.

Nebulizador térmico (Thermospray Nebulizer, TN)

Los nebulizadores térmicos se alimentan de la energía calorífica alimentada generalmente por una resistencia la cual calienta el propio líquido a nebulizar, llevándolo hasta una vaporización parcial del mismo. Una vez se ha conseguido esta vaporización, el fluido se acelera por conservación del momento y arrastra el líquido remanente haciendo que el mismo se divida en una niebla fina produciendo el aerosol muy fino y caliente. Posteriormente se ha de separar la corriente gaseosa extra. Este método aunque de una calidad de nebulizado alta presenta numerosas desventajas como altas presiones y las limitaciones que estas acarreen, una alta carga de disolvente que hace precisa una desolvatación y una alta obturación del nebulizador.

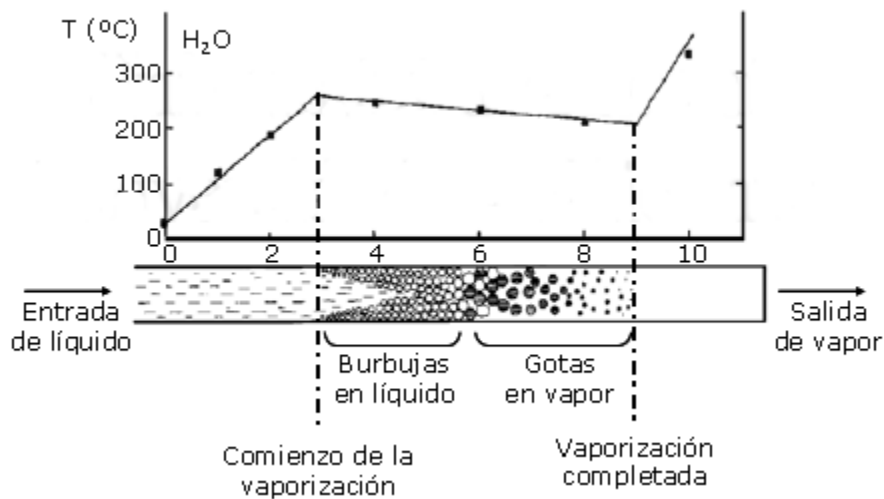


Ilustración 10 - Esquema de los procesos que sufre la muestra durante su paso por el nebulizador térmico.

Nebulizador hidráulico

En este tipo de nebulizadores la energía que se utiliza para romper la tensión superficial del líquido es la que tiene el propio líquido, por estar sometido a una gran presión o por la velocidad del mismo. La corriente de líquido pues se bombea a una alta presión y se hace pasar por un orificio muy fino el cual crea un hilo de líquido muy fino que se hace chocar contra una superficie de impacto. El choque contra dicha superficie o el contacto tangencial con el aire rompe el fluido formando una niebla de gotas. Esta tecnología tiene dos modelos de nebulizadores hidráulicos, el de baja presión y el de alta presión. Aun así está contraindicado el uso del mismo para soluciones salinas o suspensiones debido a que al trabajar a altas presiones y velocidades, el orificio de salida es frágil y con soluciones salinas o en suspensión podría obturarse o deteriorarse. Además parte de la muestra se pierde en el impacto contra la placa, lo que limita la eficiencia del nebulizador.

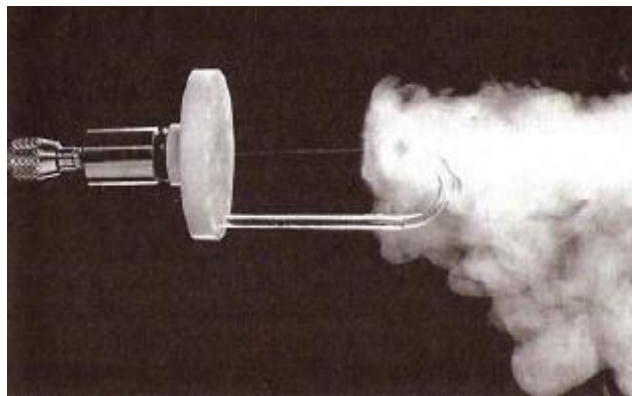


Ilustración 11 - Nebulizador hidráulico de alta presión.

Nebulizador ultrasónico (Ultrasonic Nebulizer, USN)

La fuente de energía en este tipo de nebulizadores se comunica de un transductor piezoeléctrico que trabaja en frecuencias de entre 200 kHz y 10 MHz, el cual genera ondulaciones las cuales se transmiten al líquido, el cual es nebulizado y arrastrado por la corriente gaseosa. Podemos observar que la corriente gaseosa en este tipo de nebulizadores solo actúa como transporte del líquido ya nebulizado.

Tiene una mayor eficiencia de transporte comparándolo con los nebulizadores neumáticos, pero precisa de un sistema de desolvatación, junto a una gran cantidad de muestra que junto al precio del transductor aumenta considerablemente el coste del mismo.

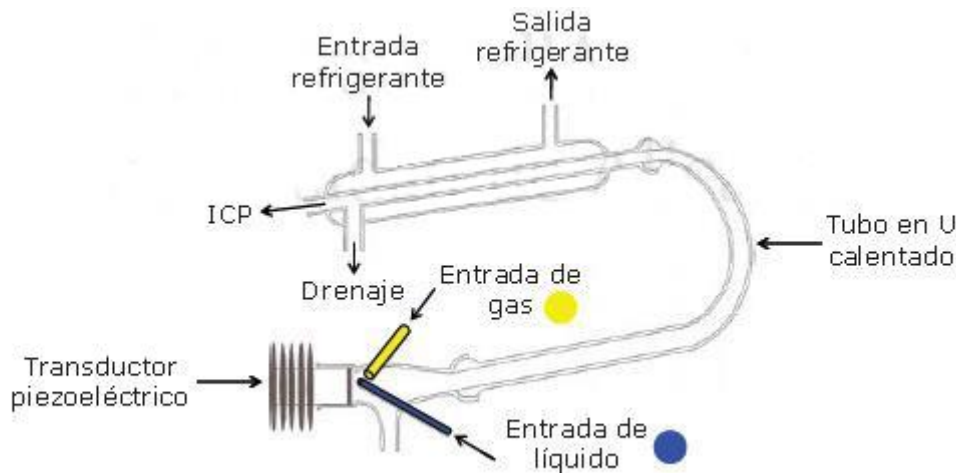


Ilustración 12 - Esquema de un nebulizador ultrasónico junto con su sistema de desolvatación.

Nebulizador electrostático (Electrospray)

La energía que utiliza un nebulizador electrostático, es como su nombre sugiere energía eléctrica, o más concretamente un campo eléctrico. Este campo eléctrico aplica una diferencia de potencial al seno de un líquido haciendo que las cargas se separen en el seno del mismo, hasta la salida de un capilar donde el líquido se abre en forma de un cono de Taylor y termina rompiéndose en pequeñas gotas o aerosol, al tener naturaleza inestable. Los aerosoles producidos por este nebulizador tienen una distribución de tamaños monodispersa alcanzando diámetros de gota relativamente finos. Para el funcionamiento de los mismos no se precisa grandes cantidades de muestra y funciona con líquidos de alta viscosidad. En contraposición el funcionamiento de este depende mucho de la conductividad y del momento dipolar de la muestra alimentada al mismo.

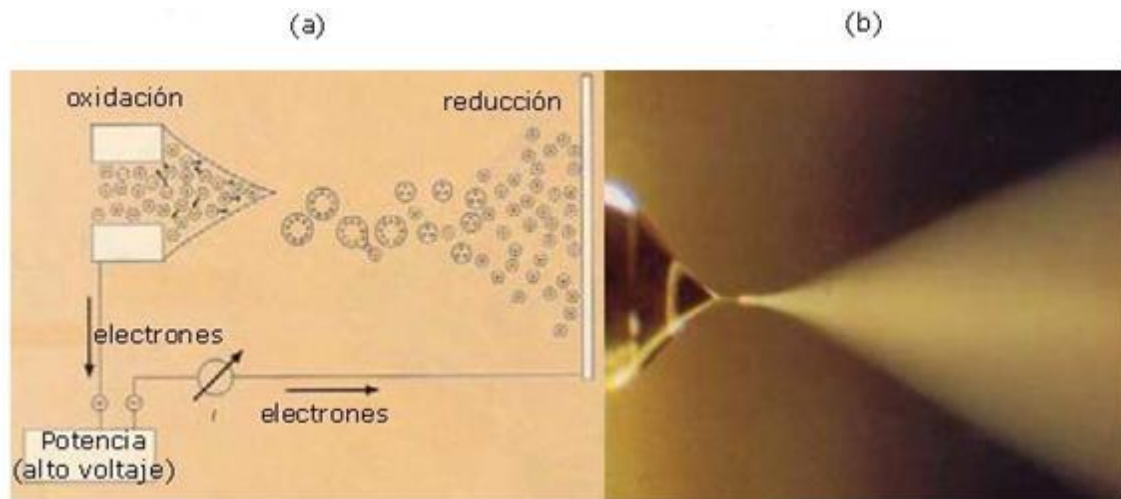


Ilustración 13. - Esquema de un nebulizador electrostático.

Nebulizador rotatorio

En este sistema de nebulización se utiliza la fuerza centrífuga para que el líquido se separe en diferentes direcciones haciendo mediante el esfuerzo mecánico que el mismo se divida en gotas de menor tamaño. La muestra es depositada en el centro de un disco giratorio, el cual proyecta la muestra hacia el borde del mismo generándose el aerosol. No presenta problemas con soluciones salinas o suspensiones, sin embargo presenta una muy pobre eficiencia de transporte.

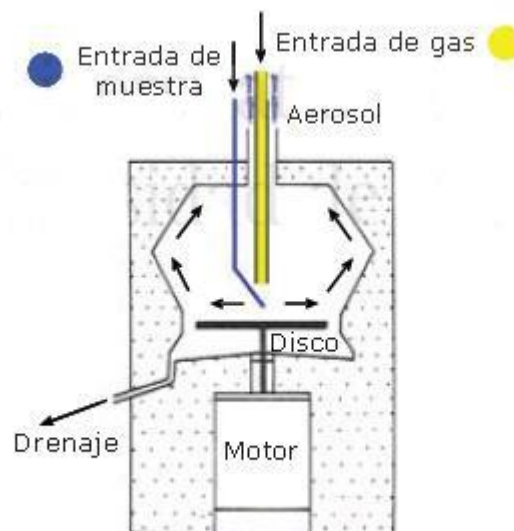


Ilustración 14 - Esquema de un nebulizador neumático rotatorio.

ANTECEDENTES

En este apartado se pretende recordar los diseños de los cabezales nebulizadores anteriores a este para dar una perspectiva sobre el recorrido que ha llevado la investigación sobre el prototipo de nebulizador:

En el primer paso del desarrollo de este, el cabezal era el mismo, pero se modificó la entrada de fluido a nebulizar la cual podía ser o lateral o central. En este primer diseño el líquido entraba a la zona de interacción con el aire a través de conductos estrechos.

Después del uso de este, se desarrolló otro modelo donde la inyección de fluido a nebulizar se ha sustituido por una alimentación por arrastre, ya que se disponían ambos fluidos en contacto con el objetivo de que el fluido saliera por una amplia lamina rodeando a la corriente de aire. Este cambio evito el uso de capilares finos por los que tenía el líquido y, consecuentemente, se evitarían problemas de obturación, además de facilitar el movimiento del líquido.

En el presente proyecto se ha conservado la alimentación del anterior modelo, y se han realizado variaciones en ciertas partes del mismo, ya sea como la altura del dispositivo, tomando dos conos distintos, y la anchura del orificio en el disco de salida.

FUNCIONAMIENTO DEL CABEZAL NEBULIZADOR

El cabezal nebulizador es la parte de la instalación en cuyo interior se juntan los dos fluidos protagonistas: el aire y el fluido a atomizar. El aire comprimido entra en la tapa tangencialmente a través de dos orificios. Tras su entrada, el flujo de aire desciende por una cavidad cónica en cuya parte central se forma una depresión, la cual es la causante de que se produzca la succión de fluido a nebulizar. Tras el cono el aire pasa por otro elemento donde se produce la atomización. En esta zona, que propiamente es la cámara de nebulización, es donde ambos flujos interaccionan y realizan el intercambio de su cantidad de movimiento produciendo la desestabilización del flujo de fluido y con ello la formación de la denominada niebla.

Tras atravesar la garganta, la niebla ya formada sale formando un cono con vértice en la salida del nebulizador.

INYECCION CENTRAL

El montaje que se disponía en esta configuración de experimentos se trata de un inyector que se introduce por el eje hasta la garganta del nebulizador, estos se montaban sobre la tapa de modo que el suministro de líquido se hacía desde la parte inferior del nebulizador. Dentro de la garganta se disponía de orificios por los cuales debía alimentarse el nebulizador de líquido. Fueron probados inicialmente con agua, con la que tenían un comportamiento aceptablemente bueno pero se descartó por los posibles problemas de obturación.

INYECCION LATERAL

Esta estrategia en contraposición con la anterior pretendía solucionar los problemas de pérdida de carga con los resultados de que no se alimentara apropiadamente el nebulizador. El aceite se introduce en la garganta a través de cuatro inyectores laterales roscados. De los inyectores sale una manguera que conduce hasta el depósito de abajo para permitir la alimentación del nebulizador. Aunque el funcionamiento del mismo cumplía con los objetivos propuestos de caudal suministrado fue descartado por la probabilidad de obstrucciones debido a las secciones pequeñas.

ARRASTRE LATERAL

El montaje realizado en el anterior proyecto como en este se trata de la creación de una cámara cilíndrica alrededor de la garganta por donde se fuerza a circular al aire y donde el mismo arrastrara el fluido a nebulizar, haciendo en este arrastre el intercambio de momento lineal y nebulizando el mismo.

DESCRIPCION EXPERIMENTAL

Descripción de la instalación

Como primera observación tendremos que a medida que se realizaba el estudio sobre la cabeza nebulizadora se procedía al montaje de un sistema de estudio diferente, ya que la alimentación de experimentos con agua y la alimentación de una mezcla de agua/glicerina o glicerina solamente eran diferentes. Asimismo tendremos partes comunes, como serán la cabeza nebulizadora, la alimentación de aire y el extractor, los cuales permanecerán invariables para todos los experimentos.

Todos los experimentos se llevaron a cabo en el interior de una campana extractora la cual eliminaba la niebla producida por el dispositivo durante la realización de los ensayos. Para los ensayos de agua no se procedía con el recubrimiento de la misma ya que no era necesario y la niebla se eliminaba sin problema, pero para los ensayos con mezclas de agua-glicerina o con glicerina, se procedía a recubrir la campana para minimizar las pérdidas de niebla al laboratorio.



Ilustración 15 - Detalle de la campana extractora (parte inferior) recubierta con un plástico para evitar fugas de niebla.

Circuito de aire

Como alimentación de la instalación se utilizó la línea de aire disponible en las instalaciones del LIFTEC con una presión manométrica de entrada máxima de 5 bar, esta misma se ha usado para todos los experimentos realizados con el nebulizador. Para la succión de la niebla resultante ya fuera de agua, mezcla o glicerina se ha utilizado otra línea de evacuación la cual vertía los productos de la atomización en la atmosfera.

El circuito está compuesto por la línea de entrada de aire, la cual se hace pasar por una válvula limitadora de presión, se desvía parte del flujo hacia el difractor para el soplado del mismo, el flujo que no se desvía pasa por una válvula manual para controlar el caudal antes del caudalímetro (rotámetro de aire) y después del mismo por un manómetro para conocer la presión de alimentación del dispositivo, después sigue automáticamente el nebulizador.



Ilustración 16 - Detalle del compresor de las instalaciones del CSIC, y sistema de control del mismo.



Ilustración 17 - Detalle del rotámetro utilizado para la medición de caudal de aire y manómetros a la salida del mismo.

Circuito alimentación fluido a nebulizar

En este apartado se han dispuesto de diferentes montajes según el objetivo perseguido. Para los ensayos de pérdidas de presión no se requería de alimentación de fluido a nebulizar, para los ensayos con agua esta alimentación se introduce desde la red controlando el caudal de la misma con un rotámetro. En los ensayos con glicerina o mezclas de glicerina y agua se dispuso de un depósito superior desde el que se descargaba fluido al nebulizador, ya que no se disponía de bomba adaptada para glicerina o mezclas.



Ilustración 18 - Detalle del rotámetro de agua utilizado en los ensayos de agua y el depósito superior con mezclas y glicerina.

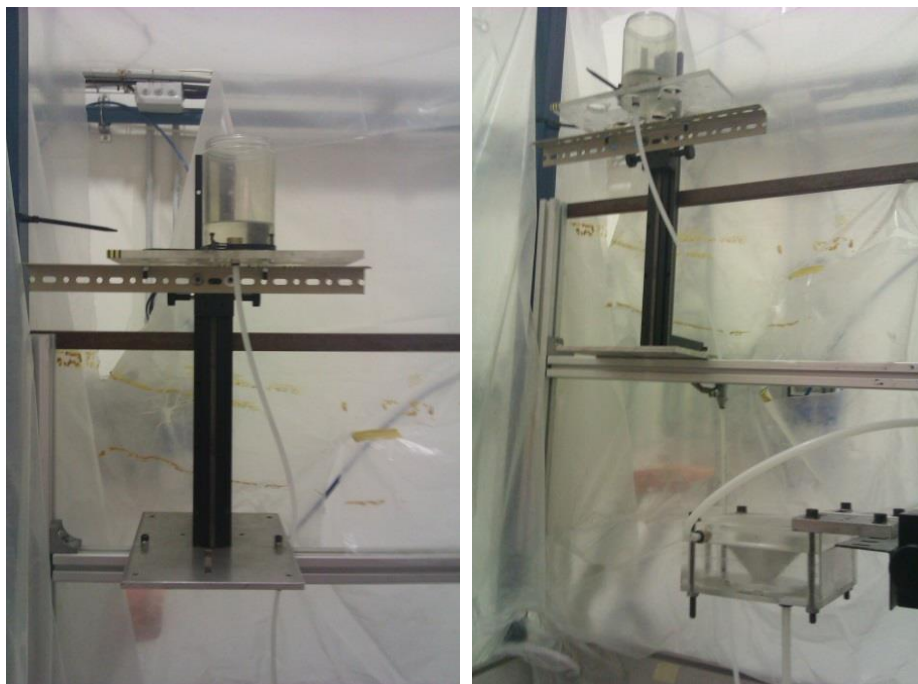


Ilustración 19 - Montaje del depósito de alimentación respecto del nebulizador.

Cabezal nebulizador

Con respecto al anterior modelo de cabezal nebulizador, se ha enfatizado en el estudio de la geometría del cono y de los diámetros del orificio del disco de salida, respecto a las juntas, se pospuso la idea para más adelante debido a que el dispositivo como se había preparado no tenía los suficientes puntos de sujeción para que la junta no presentase fugas. De esta manera se eliminaron las juntas del montaje y en su lugar se puso un polímero de sellado para que no tuviera fugas y el funcionamiento de este fuera el correcto.



Ilustración 20 - Diferentes detalles y partes del cabezal nebulizador, incluyendo el cuerpo, la tapa inferior y la tapa superior.

Caracterización de aerosoles: Fundamentos teóricos.

En general, las características de tamaño de un conjunto de gotas esféricas en un flujo bifásico suelen describirse estadísticamente por medio de la Función de Distribución, $f(D)$. Esta función, normalizada a la unidad, indica la probabilidad de que las gotas tengan un diámetro

comprendido entre D y $D+dD$. En muchos casos, por simplicidad, resulta conveniente trabajar con un diámetro medio, en lugar de utilizar la función de distribución. Sin embargo, no existe un modo único de definir un diámetro medio. Con toda generalidad, se puede definir un diámetro que denominaremos D_{jk} mediante la fórmula

$$(D_{jk})^{j-k} \equiv \frac{\int_0^{\infty} D^j f(D) dD}{\int_0^{\infty} D^k f(D) dD}$$

Según esta definición, D_{10} resulta ser la media aritmética de los diámetros, D_{20} representa el diámetro de una gota cuya superficie multiplicada por el número total de gotas es igual la superficie total del conjunto. Del mismo modo, D_{30} también denominado diámetro de volumen medio (VMD), es el diámetro de una gota cuyo volumen multiplicado por el número de gotas es igual al volumen total del líquido. Un diámetro muy utilizado es el denominado diámetro medio de Sauter (SMD) que corresponde al D_{32} , es decir, el diámetro de una gota cuya relación de volumen a superficie es igual a la del conjunto total de gotas. Este valor es especialmente significativo para casos en los que las gotas deben reaccionar con el fluido circundante (por ejemplo, en problemas de combustión). En este caso la reacción química sólo tiene lugar en la fase gas que por evaporación envuelve a la superficie de las gotas, por lo que la relación volumen/superficie influye de forma determinante en la eficiencia de la reacción. A partir de medidas discretas, los diámetros medios pueden calcularse de acuerdo con la fórmula discretizada:

$$(D_{jk})^{j-k} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i D_i^j}{\sum_{i=1}^n n_i D_i^k}$$

Donde n_i representa el número de gotas con diámetros D_i y donde hemos sustituido $f(D_i)$ por el equivalente discreto n_i/N siendo N el número total de gotas del aerosol.

De este modo, el SMD se obtendría con la siguiente expresión

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i D_i^2}$$

Hay que tener en cuenta que, dependiendo de los instrumentos utilizados, a veces las medidas no proporcionan directamente estadística en número de gotas para un diámetro determinado, sino en el volumen de fluido que constituye gotas de dicho diámetro. Según esto, a veces se habla de estadísticas en número o en volumen. En concreto, el difractor Malvern Spraytec utilizado en este estudio y que se describe a continuación, proporciona estadísticas en volumen. En su versión discreta, la fórmula utilizada para calcular diámetros medios para estadísticas en volumen sería

$$(D_{jk})^{j-k} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i D_i^j}{\sum_{i=1}^n v_i D_i^k}$$

Donde v_i representa el volumen de fluido en gotas de diámetro D_i y donde ahora $f(D_i)$ se ha sustituido por v_i/V siendo V el volumen total de líquido (nótese que $V=N \cdot D_n^3$). Para pasar de un tipo de estadística al otro sólo hay que tener en cuenta que

$$n_i = \frac{6}{\pi} \frac{v_i}{D_i^3}$$

Por lo tanto, el SMD puede también calcularse como

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n v_i D_i^2}$$

Evidentemente, la correlación entre diámetros medios volumétricos y numéricos no es directa. Aunque no es habitual, si calculamos un “diámetro D_{32} volumétrico”, D_{v32} según

$$D_{v32} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n v_i D_i^2}$$

resulta ser equivalente al D_{65} . Del mismo modo, el D_{v10} es igual al D_{43} .

Pueden utilizarse también valores medianos, que dividan la distribución en dos partes iguales atendiendo al número de gotas, superficie total, volumen total, masa, etc. Este es el caso del diámetro mediano de masa (MMD) que establece el diámetro tal que una mitad de la masa del aerosol se distribuye en gotas de tamaño mayor y la otra mitad en gotas menores. Es también común calcular los percentiles $D(10\%)$, $D(50\%)$ y $D(90\%)$ en volumen, es decir los diámetros tales que el 10%, 50% y 90% del volumen de líquido se incluye en gotas de diámetro menor que ellos. Aunque es mucho menos habitual, también podrían definirse de modo análogo percentiles en número de gotas. Con estos percentiles se puede definir una anchura de la distribución o Span como

$$Span = \frac{D(90\%) - D(10\%)}{D(50\%)}$$

Medida de distribución del tamaño de gotas:

Para medir la distribución del tamaño de gotas se ha utilizado un difractor láser, en concreto el modelo Spraytec de Malvern Instruments. Esta técnica, empleada para la medida del tamaño de las gotas y su distribución estadística, basa su funcionamiento en la difracción de un haz de luz láser por la nube de gotas. El ángulo de difracción depende del tamaño de gota, de modo que para gotas menores la luz se difracta con ángulos mayores. De

este modo puede medirse la distribución de tamaños de cualquier tipo de partículas de una fase (sólida o líquida) en otra (líquida o gaseosa) de modo repetible y fiable; aunque no da información puntual sobre cada una de las partículas. Los requisitos de esta técnica son que cada fase debe ser distinta ópticamente de la otra; y que el medio de suspensión de las partículas debe ser transparente para la longitud de onda del haz de luz láser. Esto significa, en la práctica, que el índice de refracción de las partículas a medir debe ser diferente al del medio en el cual se encuentran en suspensión.

El dispositivo de medida está formado por una unidad emisora, en este caso un láser de diodo de 5 mW, 670 nm y 10 mm de diámetro de haz colimado, y una unidad de recepción, enfrentada al haz láser, compuesta por una serie de detectores en anillo que recogen la luz difractada por las gotas o partículas iluminadas por el haz láser mediante una lente de focal adecuada sin formar previamente una imagen de la partícula a medir sobre el detector. El volumen de medida del flujo a analizar debe estar localizado entre las dos unidades, a una distancia de la lente colectora menor que la distancia focal, para que no se forme imagen. La estructura esquemática del equipo es la que se muestra en la Figura 5. Para las presentes medidas, el difractómetro se ha equipado con una lente colectora de 450 mm de focal lo que permite medir gotas en un rango comprendido entre $2,25\ \mu\text{m}$ y $850\ \mu\text{m}$.

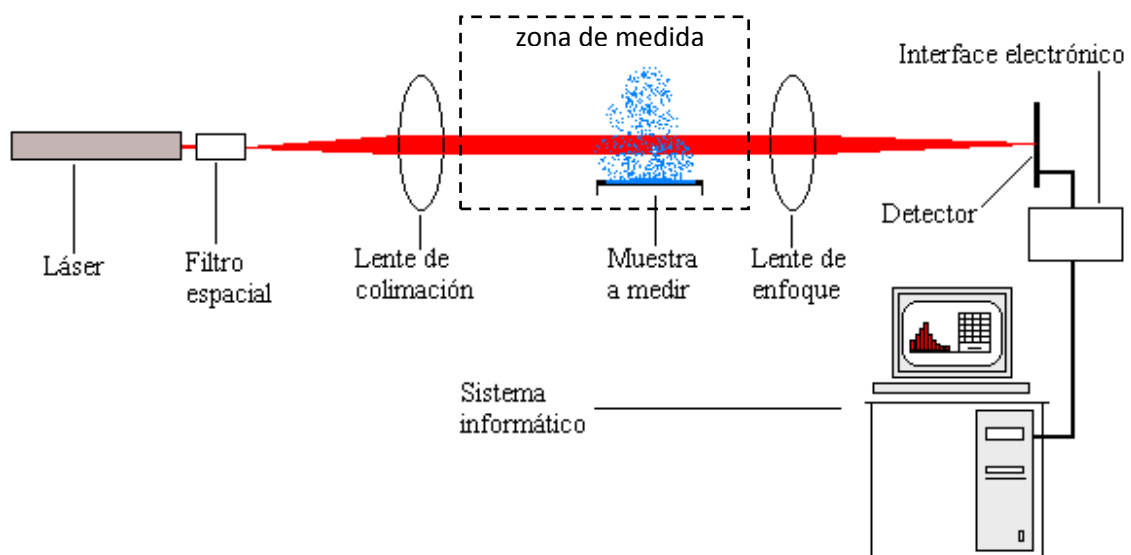


Ilustración 21 - Configuración básica del difractómetro Malvern Spraytec

Durante una medida individual, las señales recopiladas en los anillos detectores son digitalizadas en orden consecutivo, y almacenadas en el ordenador para ser promediadas con las señales de la siguiente medida. En la terminología técnica, a las medidas individuales se les conoce como “barrido”. Normalmente, se toman los datos durante unos miles de barridos para asegurar que la estadística es suficientemente buena por la gran cantidad de datos. Estos datos se procesan luego con la ayuda del programa de cómputo para obtener los resultados,

es decir, la distribución de tamaños de partículas. Este proceso se puede realizar a una frecuencia máxima de 2500 Hz.

Para obtener la distribución de tamaño de partículas a partir de las energías registradas por los detectores, primero se elimina el ruido de fondo y posteriormente, de acuerdo con los índices de refracción de las gotas y el medio continuo (en este caso agua y aire), se calcula teóricamente una distribución de gotas esféricas y se compara la distribución de energías que produciría en el detector con las medidas. El proceso se refina iterativamente. El cálculo de las energías teóricas se realiza resolviendo un sistema de ecuaciones lineales, aunque mal condicionado. Si las gotas no son esféricas, las medidas pueden ser poco precisas.

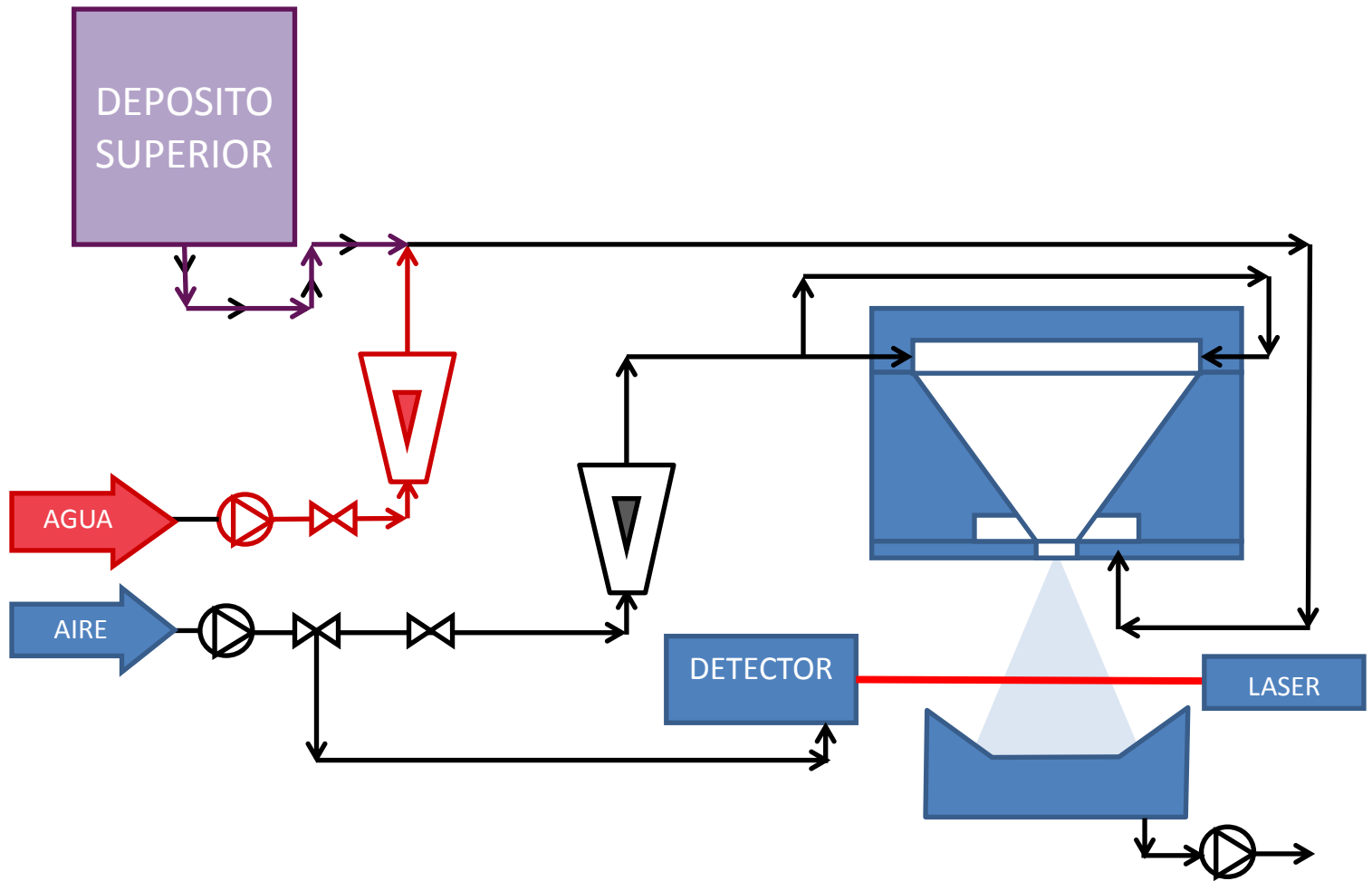
Las clases de tamaños correspondientes a la lente de 450 mm son las siguientes:

Clase	Intervalo (μm)	Clase	Intervalo (μm)	Clase	Intervalo (μm)	Clase	Intervalo (μm)
1	0.25 – 0.29	16	1.99 – 2.28	31	15.81 – 18.15	46	125.74 – 144.38
2	0.29 – 0.33	17	2.28 – 2.62	32	18.15 – 20.85	47	144.38 – 165.79
3	0.33 – 0.38	18	2.62 – 3.01	33	20.85 – 23.94	48	165.79 – 190.36
4	0.38 – 0.43	19	3.01 – 3.45	34	23.94 – 27.49	49	190.36 – 218.59
5	0.43 – 0.50	20	3.45 – 3.97	35	27.49 – 31.56	50	218.59 – 251.00
6	0.50 – 0.57	21	3.97 – 4.55	36	31.56 – 36.24	51	251.00 – 288.20
7	0.57 – 0.66	22	4.55 – 5.23	37	36.24 – 41.61	52	288.20 – 330.92
8	0.66 – 0.75	23	5.23 – 6.01	38	41.61 – 47.78	53	330.92 – 379.98
9	0.75 – 0.86	24	6.01 – 6.90	39	47.78 – 54.86	54	379.98 – 436.31
10	0.86 – 1.00	25	6.90 – 7.92	40	54.86 – 63.00	55	436.31 – 500.99
11	1.00 – 1.14	26	7.92 – 9.10	41	63.00 – 72.33	56	500.99 – 575.26
12	1.14 – 1.31	27	9.10 – 10.44	42	72.33 – 83.06	57	575.26 – 660.53
13	1.31 – 1.51	28	10.44 – 12.00	43	83.06 – 95.37	58	660.53 – 758.46
14	1.51 – 1.73	29	12.00 – 13.77	44	95.37 – 109.51	59	758.46 – 870.89
15	1.73 – 1.99	30	13.77 – 15.81	45	109.51 – 125.74	60	870.89 – 1000.0

Una vez conocida la distribución de gotas por clases de tamaños, cualquier otra información sobre diámetros medios del aerosol puede derivarse de ella mediante una manipulación numérica de los resultados volumétricos, suponiendo que las partículas son esféricas. Basta para ello aplicar las ecuaciones descritas en la sección de fundamentos teóricos.

Esquema general de la instalación

Como se ha comentado anteriormente se dispondrá de dos montajes según la alimentación de líquido al dispositivo, variará en la alimentación de agua por depósito superior o por una toma a la corriente de agua.



ENSAYOS

El montaje descrito anteriormente hace referencia a las partes que permanecen invariables durante el desarrollo de los diferentes estudios que hemos realizado con el dispositivo desarrollado. Los experimentos se realizan en dos maquetas con diferentes geometrías y varias placas con los diferentes diámetros de salida de garganta, y en ellas se ensayaran líquidos con diferente viscosidad y para distintos caudales de aire.

Variación de presión.

Como primer paso dentro del estudio del dispositivo, observaremos cuál de los dos conos crea un mejor escenario para que este desempeñe el comportamiento óptimo aceptable. Para esto estudiaremos la depresión que este es capaz de generar con las condiciones impuestas por las instalaciones donde desarrollaremos los experimentos. Con este objetivo dispondremos de los experimentos de este apartado variando el caudal de aire que introducimos al dispositivo observando la variación de presión entre la atmosfera y la cavidad donde introduciremos el fluido a nebulizar, asimismo observaremos el efecto que se produce variando el diámetro del orificio de salida del dispositivo.

A continuación presentamos los resultados, (variaciones de presión en milibar), de los experimentos realizados en este apartado, para ambos conos:

Cono alto	Diam P[mm]	12	13	14	15	16	17	18
Qa [Nm ³ /h]								
10		3,7	4,1	3,1	1,3	1,1	0,3	1,5
12		6,3	6,6	5,6	3	2,3	1,2	2,7
14		13,9	13,8	10,6	5,4	4,9	3,1	2,9
16		21,2	21	19,7	10,8	9,6	7,9	2,4
18		30,1	31,7	26,5	18	15,3	11,9	0,2
20		43,6	49,6	32,8	26,6	24,1	27,5	5,7
22		57	64,5	64,9	42,9	44	37,9	19,7
24		84,6	91,2	82,6	65,1	64,4	54,6	36,5
25		101,2	108	95,7	77,9	74,2	68,9	44,3

Tabla 1 - Variaciones de presión atmósfera-cámara de nebulización de diferentes montajes cuerpo-tapa de salida para cono alto.

Cono bajo	DiamP[mm]	12	13	14	15	16	17	18
Qa [Nm ³ /h]								
10		1,6	2,8	1,5	0,5	0	0	1,4
12		3	4,6	3	1,5	0,7	0,7	3,4
14		0,2	13,2	7,7	4,5	2,8	3,2	3,1
16		10,8	22,9	16,8	9,3	7,2	8	1
18		20	32,3	27,2	15,9	14,7	13,4	2
20		42,4	44,7	45,2	21,8	24,4	29,7	5,1
22		65,5	67,4	62,1	38,9	40,4	39,8	21,4
24		71,8	79,9	83,7	45,6	48,7	47,2	25,3
25		72	85,1	91,8	50,3	53,4	57,7	31,3

Tabla 2 - Variaciones de presión atmósfera-cámara de nebulización de diferentes montajes cuerpo-tapa de salida para cono bajo.

Podemos observar que para uno de los conos tendremos un orificio de salida para el cual la variación de presión entre la atmósfera y la cámara de alimentación será máxima.

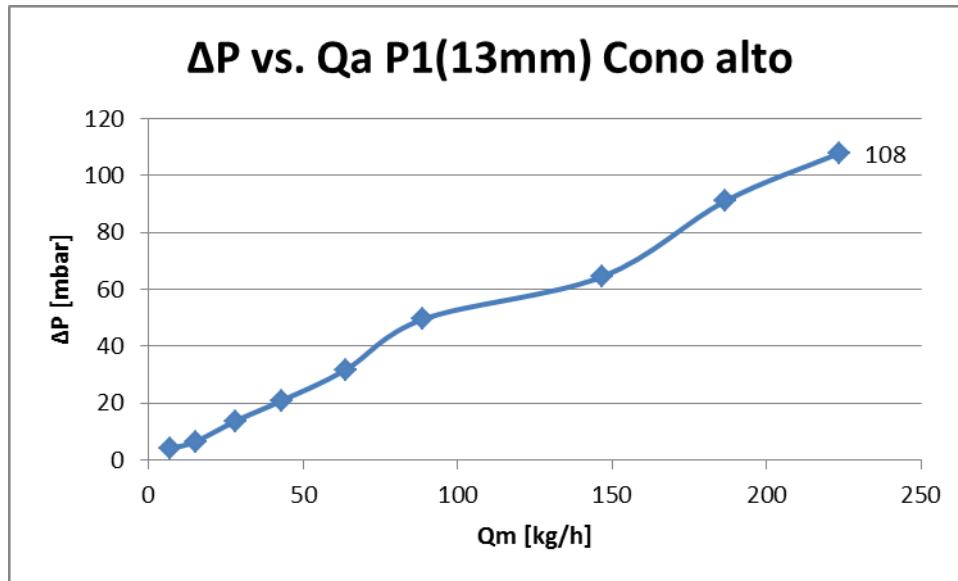


Ilustración 22 - Variación de presión atm-cámara de nebulización con el dtapa óptimo.

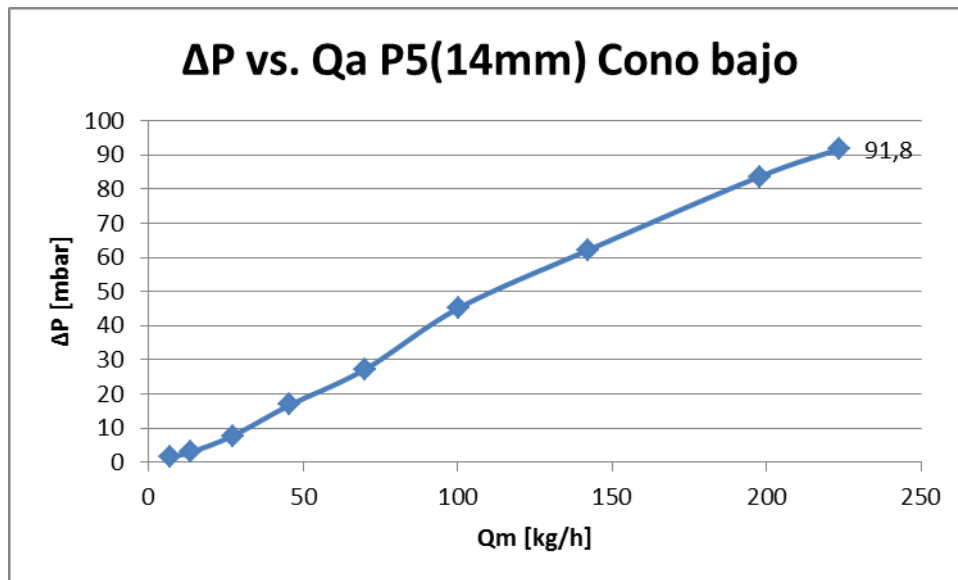


Ilustración 23 - Variación de presión atm-cámara de nebulización con el dtapa óptimo.

Aquí podemos ver las dos configuraciones propicias para cada uno de los montajes, como podemos observar tanto en la gráfica como en las tablas de los resultados tendremos que el montaje realizado con el “cono alto” nos da mayores variaciones de presión, con lo que el efecto Venturi en el interior del dispositivo se da con mayor eficiencia.

Ensayos con agua

En base a los resultados de los primeros ensayos realizados con el nebulizador concentraremos los siguientes ensayos en torno al montaje con el cono más alto, pues nos proporcionaba unas variaciones de presión mayores, por lo que será más factible tratar caudales de fluido a nebulizar mayores que en el otro montaje, que daba variaciones de presión menores. En este montaje y con diferencia del anterior introduciremos agua en la cavidad de alimentación del fluido a nebulizar. En estos experimentos realizaremos medidas de distribución de tamaño de

gota con un difractómetro óptico, por lo que se podrá comprobar la calidad de la nebulización. Con esta configuración también se variarían los diámetros de salida del venturi-vortex así como los caudales de agua y aire.

A continuación presentamos una tabla con los resultados óptimos según los caudales utilizados de agua o de aire, tamaños de gota en micrómetros, el resultado tomado de diámetro de gota es el diámetro de Sauter, D_{32} :

Qa [m3N/h]		10	12	14	16	18	20	22	24
Qw [l/h]	QwR [l/h]								
20	17,1404	56,5	35,35	24,04	18,49	18,61	19,41	11,55	9,77
30	27,6174	71,64	44,15	36,1	24,73	19,97	18,42	15,72	13,29
40	38,0944	88,98	61,21	47,58	29,23	22,59	20,89	18,03	16,25
50	48,5714	104,966	63,04	56,25	33,14	26,65	23,09	21,33	18,69
60	59,0484	131,27	77,19	60,28	34,38	30,06	25,4	22,41	21,32
Diámetro tapa [mm]		18	18	18	18	18	15	15	15

Tabla 3 - Tamaños de gota para diferentes caudales de agua y de aire con el montaje seleccionado.

Podemos observar que para caudales pequeños de aire tendremos mejores resultados con el diámetro del orificio de salida mayor, esto podría deberse a que con una salida más pequeña tendremos fenómenos de choque entre las gotas formadas por la nebulización y una mayor probabilidad de que se produzca coalescencia formando gotas de mayor tamaño. Puesto que al aumentar el caudal de aire y la capacidad de nebulización del dispositivo tendremos que el diámetro de las gotas mejora para orificios menores, ya que la corriente de salida no llega a colapsarse y los fenómenos de choque y coalescencia se reducen.

El comportamiento general para un mismo diámetro de salida con diferentes caudales de agua se puede resumir gráficamente de esta manera:

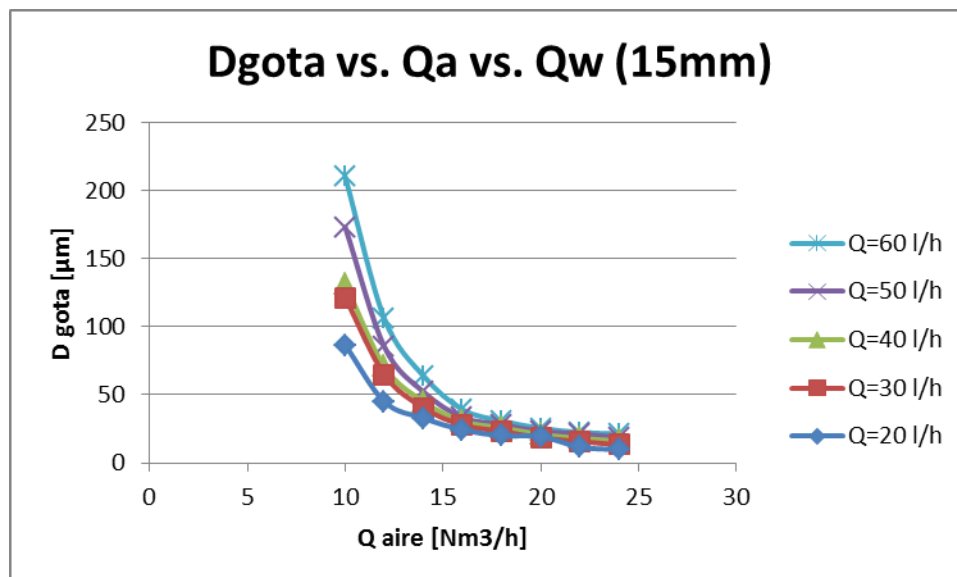


Ilustración 24 - Representación de tamaños de gota frente al caudal de aire con diferentes series de caudal de agua.

En un segundo apartado de los ensayos con agua, se variara la posición a lo largo y lo ancho del cono formado a la salida del venturi-vortex para estudiar el comportamiento de las gotas micrónicas en la atmósfera presente. A continuación mostramos las gráficas con los resultados del estudio de la posición respecto del nebulizador:

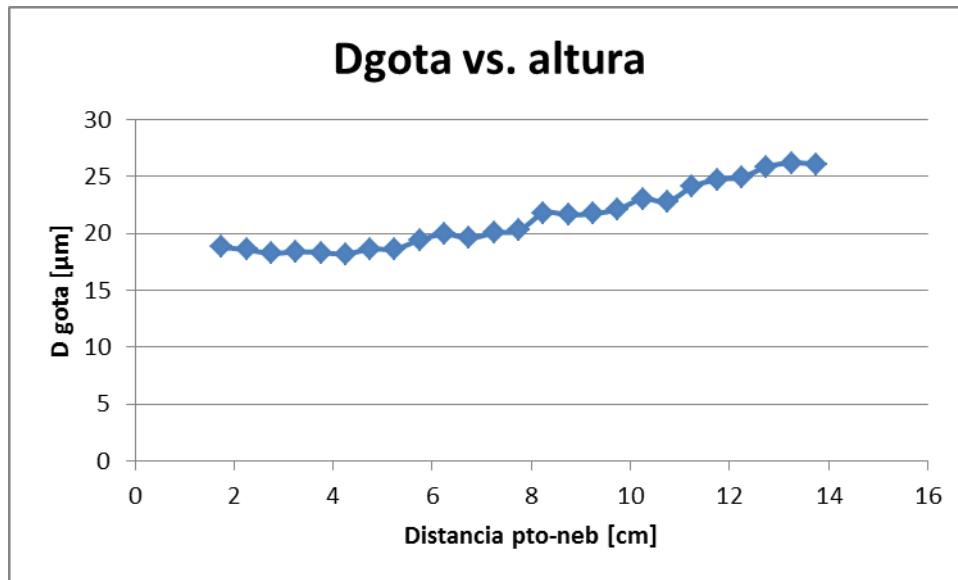


Ilustración 25 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractómetro, muestreo vertical.

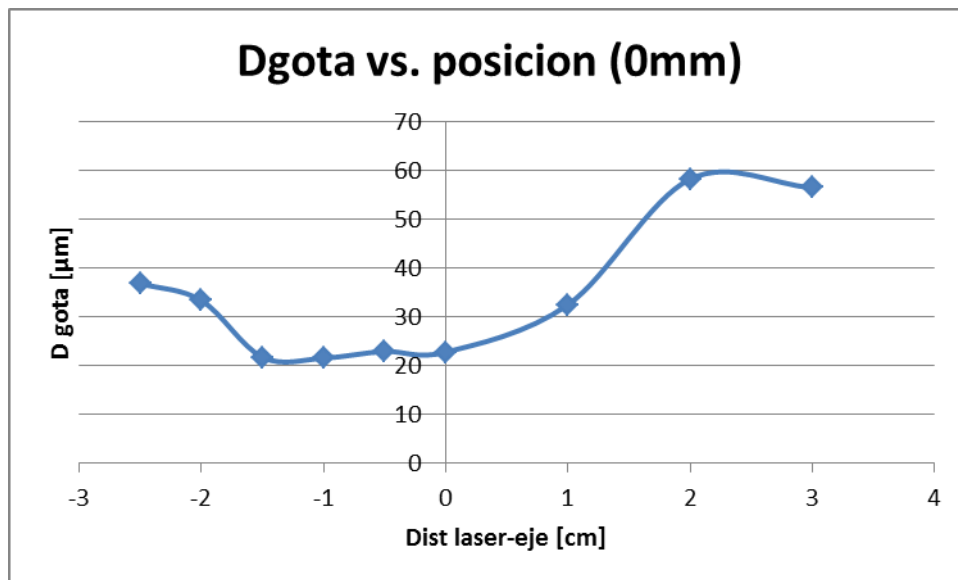


Ilustración 26 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractómetro, muestreo horizontal.

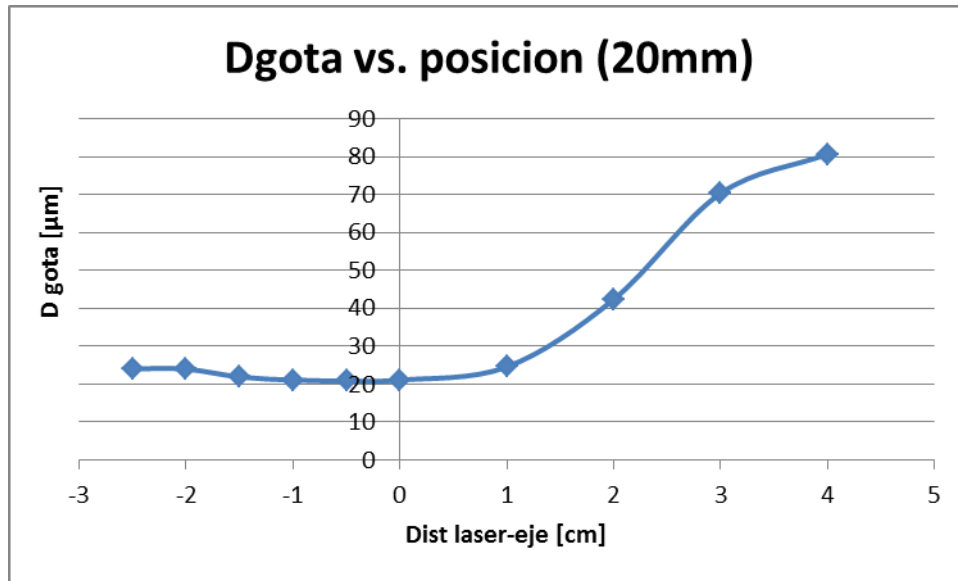


Ilustración 27 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractómetro, muestreo horizontal.

En la primera gráfica podemos observar que a medida que aumentamos la distancia en sentido descendente desde el vértice del cono de nebulización hasta la zona donde se hace efectiva la medida tendremos un aumento de los diámetros de gota.

En las dos gráficas siguientes tenemos una representación de la distribución de tamaños de gota a lo ancho del cono de salida del dispositivo según dos sentidos desde el vértice de dicho cono. Como podemos observar tienen un comportamiento similar en los dos sentidos, pero extraño debido a que a la salida del dispositivo y a ambos lados del cono formado se deberían dar idénticas condiciones para que en la gráfica se formara un valle con ambas cumbres a la misma altura. La falta de simetría puede deberse al pequeño obstáculo constituido por el tubo de entrada de líquido. Tras el estudio en detalle del dispositivo se dedujo que en el conducto de alimentación del mismo al estar demasiado cerca de la salida podría actuar como deflector y atrapar las gotas de mayor tamaño al chocar con el mismo y reducir la medida del detector de tamaños de gota. De esto mismo y haciendo referencia a un dispositivo utilizado en una versión anterior, el deflector, podremos tener que no es necesario que este se presente en frente del flujo para eliminar parte de las gotas de diámetro mayor, sino que es suficiente con una presencia circundante.

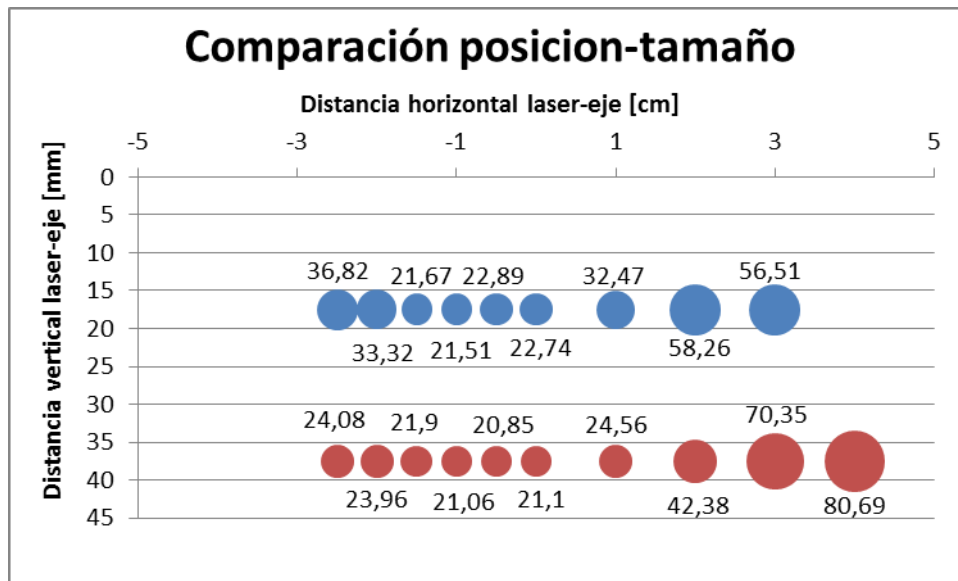


Ilustración 28 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractor, muestreos horizontales a dos alturas.

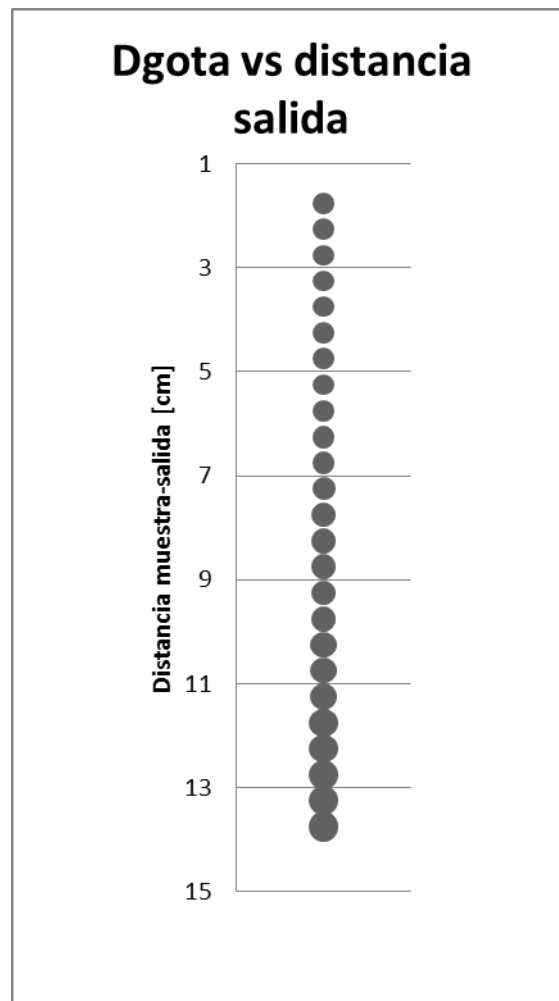


Ilustración 29 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractor, muestreo vertical.

De todas maneras, los resultados obtenidos se acercan a las suposiciones hechas sobre los mismos, por lo que el comportamiento del dispositivo es correcto dentro de lo esperado.

El aumento del diámetro con la distancia axial sugiere que se siguen produciendo fenómenos de coalescencia.

Ensayos con glicerina

En este apartado se dispone un depósito superior el cual contiene la glicerina para la alimentación del venturi-vortex, ya que la viscosidad del fluido impide el suministro con las bombas disponibles. Asimismo se ha empleado el mismo difractómetro para la medida de distribuciones de tamaño, con la variación de que se sustituirá, en el cálculo, el índice de refracción del agua por el de la glicerina. Se han estudiado al igual que para el agua diferentes alturas para observar el comportamiento de la glicerina a diferentes distancias de la salida del dispositivo para comprobar la validez de los resultados de la misma. De igual manera que en los apartados anteriores, tendremos en cuenta el diámetro de salida del venturi-vortex, esto ya para una misma altura.

A continuación mostramos los resultados de diámetros de gota obtenidos a tres distancias respecto del nebulizador, como nota aclaratoria la distancia propiamente de la salida hasta el eje del haz láser de medida era de 1,8 cm, por lo que las distancias entre la salida y el haz láser serían de 0+18, 40+18 y 80+18 mm:

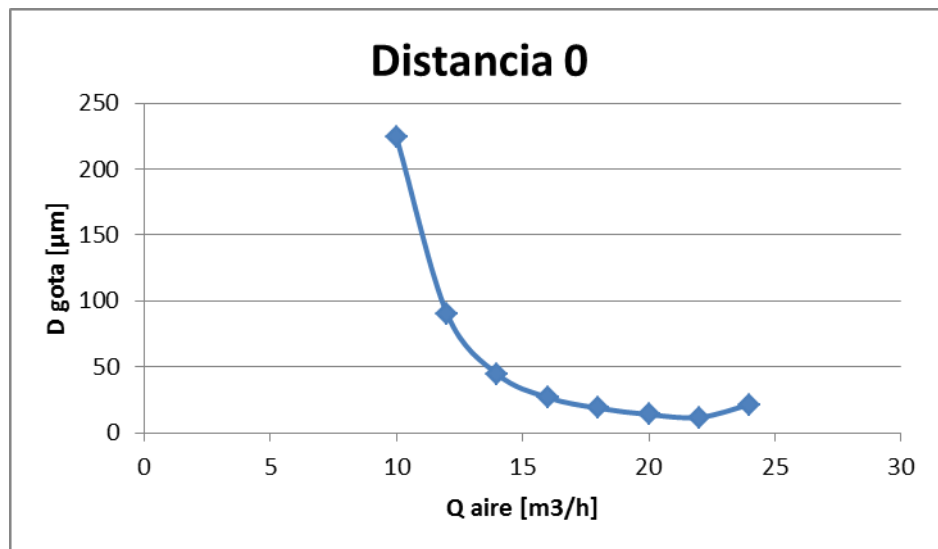


Ilustración 30 - Medidas de tamaños de gota dependiendo del Qaire y Dtapa de 15mm a "0" mm de la salida del nebulizador.

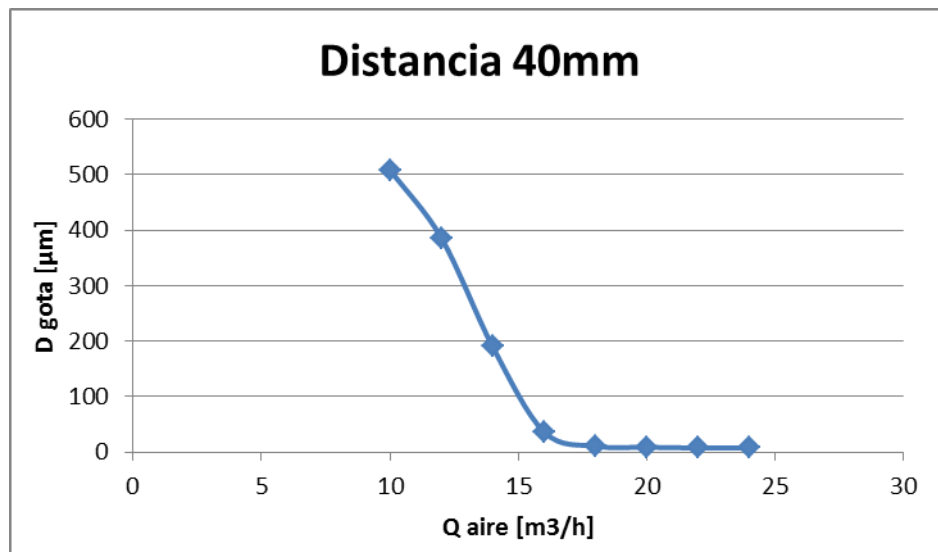


Ilustración 31 - Medidas de tamaños de gota dependiendo del Qaire y Dtapa de 15mm a “40” mm de la salida del nebulizador.

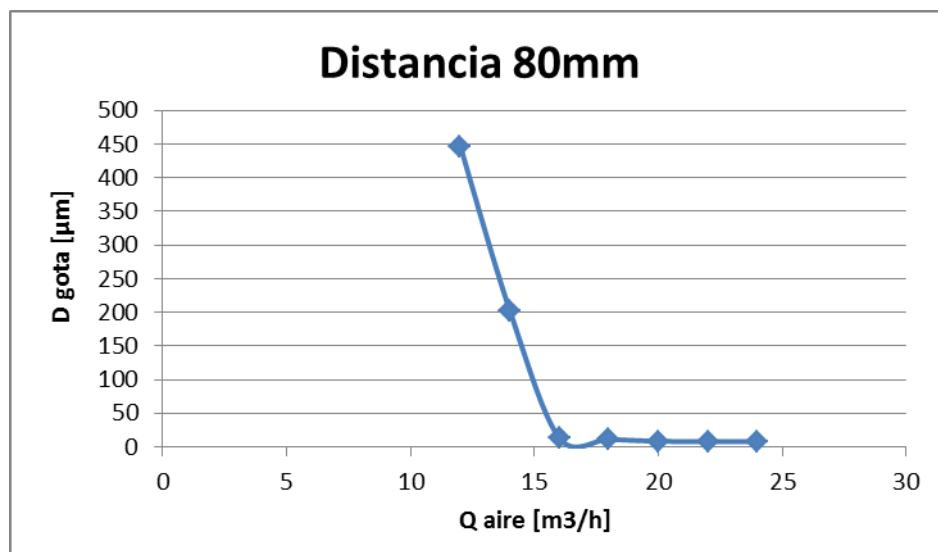


Ilustración 32 - Medidas de tamaños de gota dependiendo del Qaire y Dtapa de 15mm a “80” mm de la salida del nebulizador.

Se puede observar que al tomar datos a diferentes distancias de la salida del dispositivo, los resultados varían significativamente, además podemos observar desviaciones más acentuadas en el primer caso, que sería el más próximo a la salida.

Se debatió en el transcurso del proyecto que estas desviaciones podrían ser debidas a la formación de filamentos a la salida del nebulizador por las mayores velocidades de aire en esta zona, y que a medida que se alejaba el punto de medida de la salida el efecto se aminoraba por lo que las medidas serían más confiables. En base a este razonamiento se decidió realizar las medidas de distribución de diámetros de gota a una distancia mayor que la utilizada hasta

el momento, evitando la presencia de filamentos en el entorno de toma de datos. Como consecuencia se subió cuatro centímetros la altura del dispositivo de nebulización.

El próximo estudio fue de la variación del orificio de salida para el tratamiento de glicerina con el nebulizador. Nos interesamos especialmente en los diámetros cercanos a 15 mm y en esta etapa del estudio se desecharon los orificios de 12 y 18 mm, ya que para el primero obtuvimos datos confusos dado que se podrían dar fenómenos de colisión y fusión de gotas, y para el segundo se producían reflujos y pérdidas de estabilidad en el flujo en las cercanías de la salida del nebulizador, pudiendo penetrar gotas en el difractómetro, ocasionando la toma errónea de datos del mismo.

A continuación representamos los resultados óptimos de cada montaje en la tabla adjunta:

D salida [mm]	D gota [μm]	Q glic [l/h]
13	9,21	0,984
14	7,38	0,9979
15	7,58	0,659
16	7,33	0,8396
17	8,99	0,504

Tabla 4 - Resultados óptimos con glicerina.

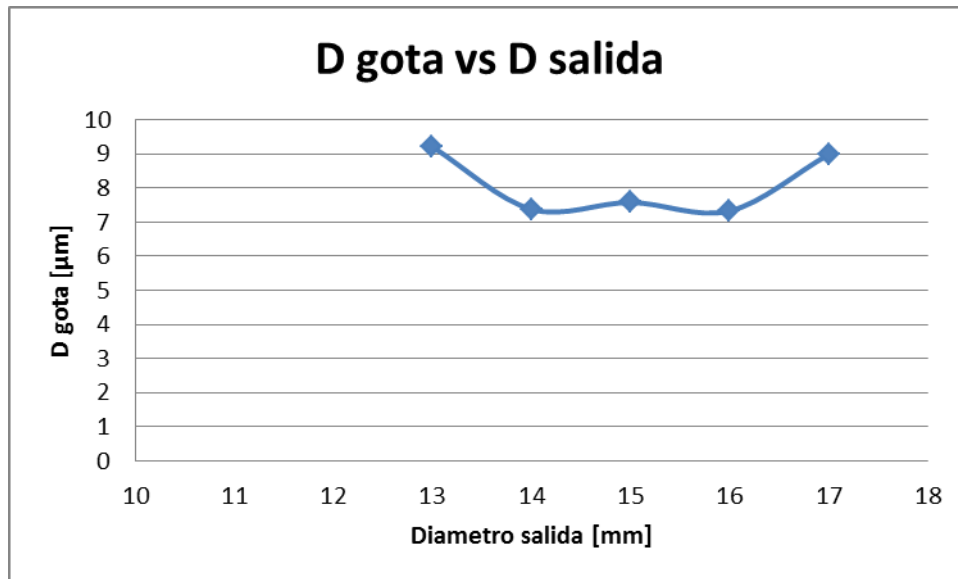


Ilustración 33 - Relación de resultados óptimos de D gota frente al diámetro de tapa de salida.

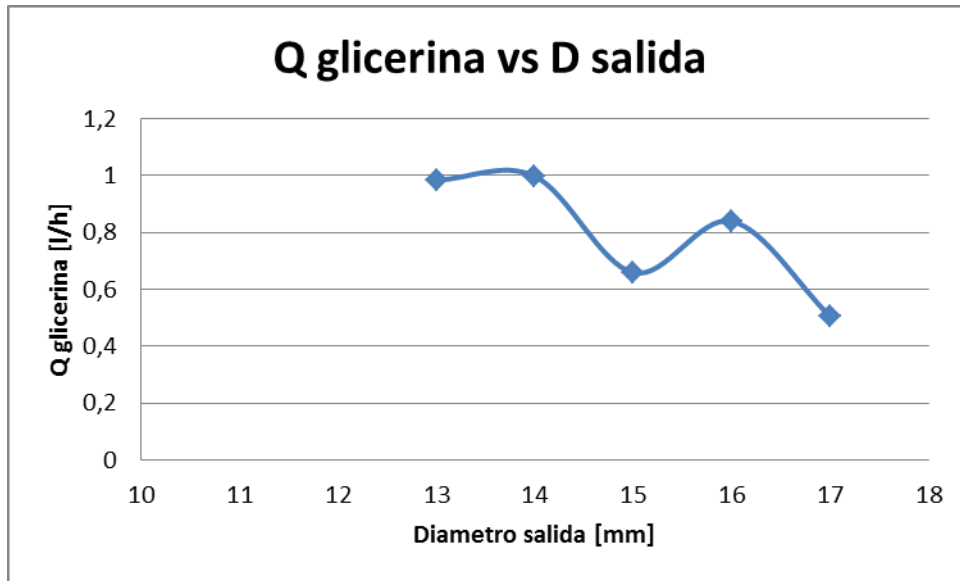


Ilustración 34 - Relación de resultados óptimos de Q glicerina frente al diámetro de tapa de salida.

Podemos observar en los ensayos realizados con glicerina que el diámetro de gota tendrá un mínimo en las inmediaciones del diámetro de 15 mm, por otra parte a medida que aumentamos el diámetro de salida tendremos que el dispositivo succiona una menor cantidad de glicerina. Esto es debido a la depresión, en la cavidad donde se produce la nebulización, es menos importante para los diámetros de salida más grandes y la succión por parte del dispositivo sea menor y de esta manera el consumo disminuya.

También se ha pensado que debido a la viscosidad mayor de la glicerina la turbulencia generada en la cavidad de choque de fluidos no sea suficiente para que venza las fuerzas viscosas y por lo tanto no se dé una mezcla de corrientes lo suficiente buena para romper un caudal tan importante como el que se obtuvo usando agua.

Ensayos con mezclas

Para esta etapa de desarrollo del dispositivo nos interesa estudiar el comportamiento de fluidos con una viscosidad intermedia entre la glicerina y el agua, para poder enlazar las diferentes etapas de la investigación en el mismo. Al igual que en los experimentos anteriores se variaran los diámetros de salida del dispositivo y el caudal de alimentación de aire, las medidas de distribución de diámetros de gota se realizarán con el mismo difractor, con la adaptación para el índice de refracción de la glicerina.

Presentamos aquí la gráfica tipo de los resultados para los diferentes orificios de salida, ya que la apariencia de las gráficas es bastante similar:

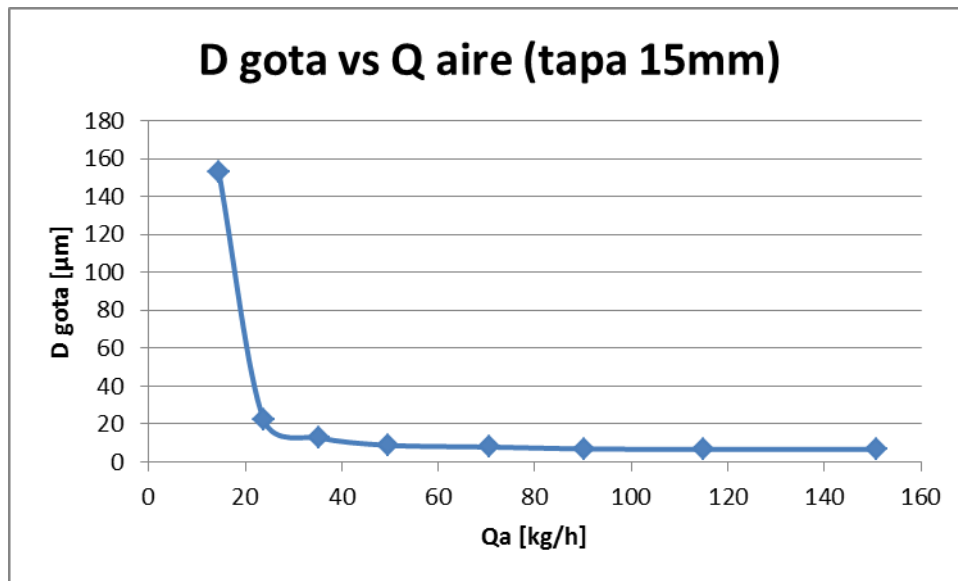


Ilustración 35 – Relación entre el diámetro de gota y el caudal de aire alimentado al dispositivo para la tapa de 15mm.

El resumen de los resultados para los ensayos con mezclas podríamos exponerlos de esta manera:

D salida [mm]	D gota [μm]	Q mezcla [l/h]
13	7,4	1,7689
14	8,35	1,8754
15	6,66	1,9425
16	7,95	2,3122

Tabla 5 - Resultados óptimos para mezclas.

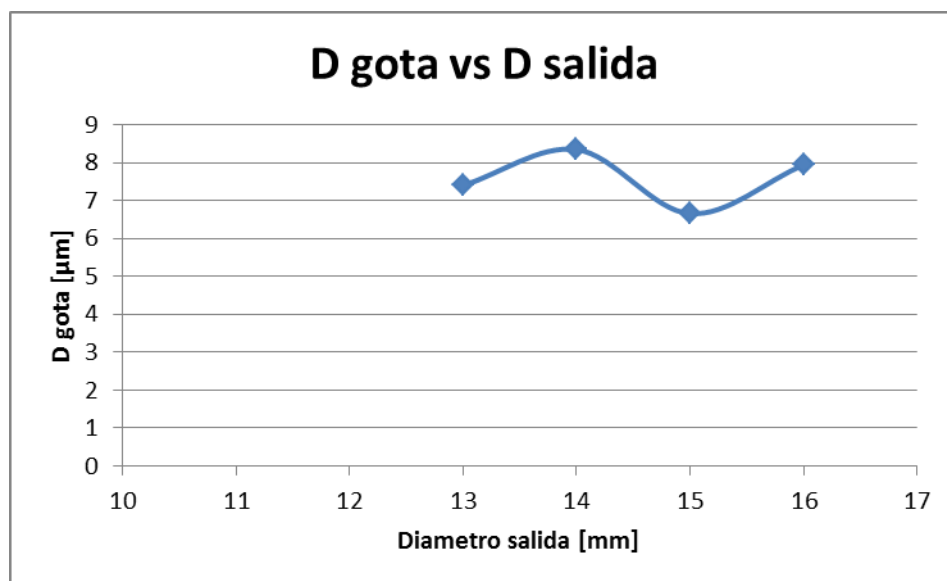


Ilustración 36 - Relación de resultados óptimos de D gota frente al diámetro de tapa de salida.

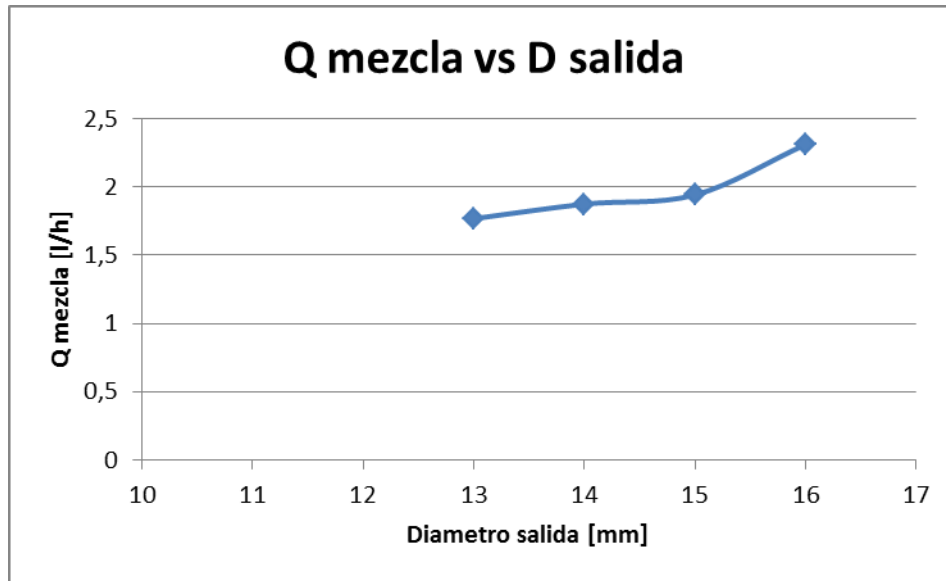


Ilustración 37 - Relación de resultados óptimos de Q mezcla frente al diámetro de tapa de salida.

Podemos observar como para los mismos caudales de aire y los mismos orificios de salida, el consumo del dispositivo es mayor respecto de los ensayos con glicerina. Este comportamiento es comprensible debido al descenso de la viscosidad del líquido al haber realizado la mezcla.

Si observamos los resultados que hemos obtenido de los ensayos con glicerina y de los ensayos con mezclas, las gráficas que relacionan el tamaño de gota y el diámetro de salida observaremos un comportamiento similar, pues en torno al diámetro de 15 mm se dan los valores mínimos de tamaño de gota, sin embargo si observamos el caudal que trata el dispositivo con glicerina y con mezcla observaremos comportamientos diferentes, pues con glicerina al aumentar el diámetro de salida, el caudal disminuye, pero con la mezcla el caudal aumenta.

Este comportamiento puede ser debido a la viscosidad, ya que al tratar con glicerina se precisara una velocidad de aire mayor para contrarrestar el efecto estabilizador de la viscosidad, la cual no se alcanza como para que la turbulencia creada sea capaz de asumir toda la presencia de glicerina. En el caso de la mezcla de glicerina y agua, tendremos un líquido con una viscosidad inferior el cual es arrastrado fácilmente por la corriente de aire presente en la cámara de nebulización y es capaz de tratar caudales mayores con una gran facilidad respecto a la glicerina.

Finalmente, observaremos la influencia del caudal alimentado al dispositivo de fluido a nebulizar, variando la altura del depósito de suministro de líquido a nebulizar. Se presenta una tabla con los resultados de los experimentos de este apartado:

Altura [mm]	D gota [μ m]	Q mezcla [l/h]
0	6,66	1,9425
183	7,67	2,674329
367	8,28	2,788758
550	8,76	3,536864

Tabla 6 - Resultados de tamaños de gota a diferentes caudales de mezcla.

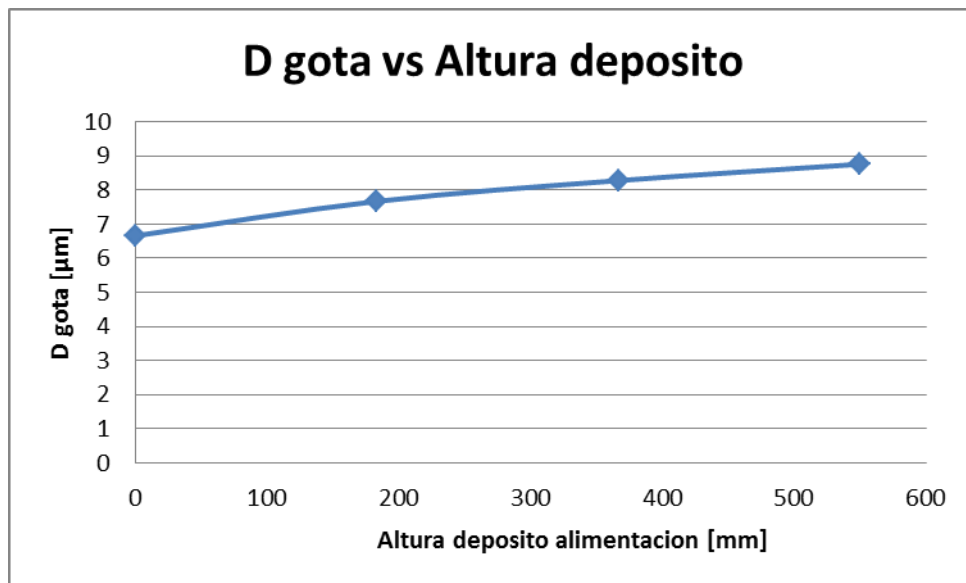


Ilustración 38 - Relación entre el Dgota y la altura del depósito de alimentación.

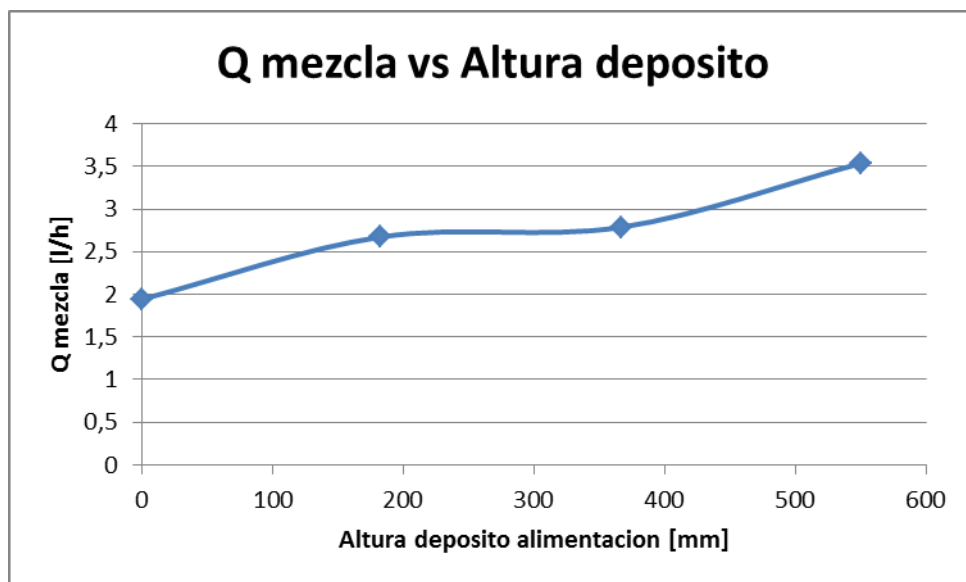


Ilustración 39 - Dependencia del caudal de alimentación de mezcla con la altura a la que se presentaba el depósito.

Se puede observar fácilmente que el caudal de la mezcla agua-glicerina aumenta al mismo tiempo que subimos el depósito de alimentación, lógico pues al aumentar la diferencia de cotas podemos conseguir una diferencia de presión mayor, y por consiguiente mayor caudal. Al mismo tiempo que aumentamos el caudal de mezcla podemos observar como también el diámetro de gota aumenta, pues el dispositivo al trabajar con un mayor caudal de mezcla y con el mismo caudal de aire, tendrá menor capacidad para romper toda la tensión superficial de este.

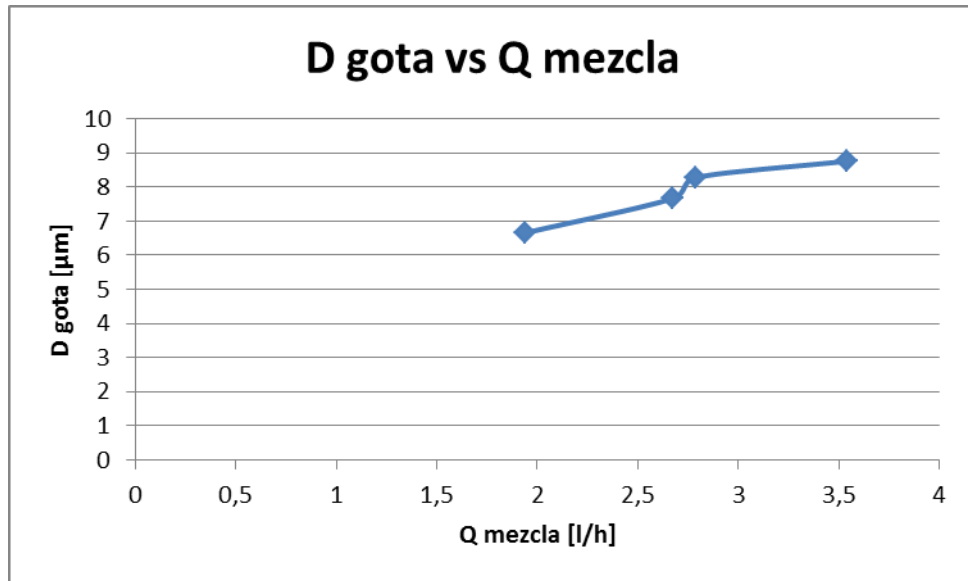


Ilustración 40 - Resultados óptimos para dgota al variar la alimentación de mezcla agua-glicerina.

Desarrollo de las mezclas:

Para la última etapa de los ensayos llevados a cabo, se estudió como realizar las mezclas para poder disponer de un líquido de viscosidad intermedia entre la glicerina y el agua. Se consultó bibliografía especializada sobre el comportamiento de mezclas de agua-glicerina para poder aproximarlas a una función exponencial y obtener una composición másica de una mezcla de glicerina-agua que cumpla con las especificaciones dadas.

Para esto se aproximará tanto la viscosidad dinámica como la cinemática a una función exponencial y de esta se despejara la composición másica para que nos dé una viscosidad media entre la de la glicerina y el agua.

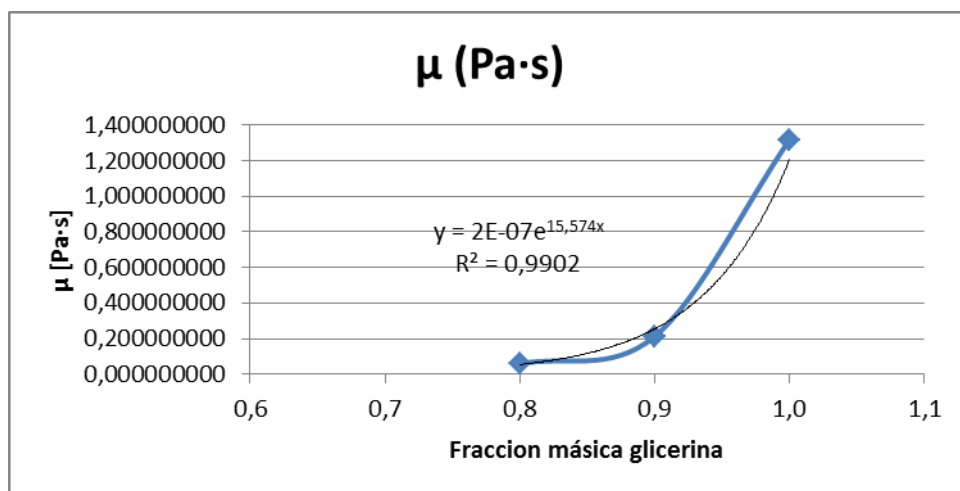


Ilustración 41 - Dependencia de la viscosidad dinámica frente a la composición de la mezcla (agua-glicerina).

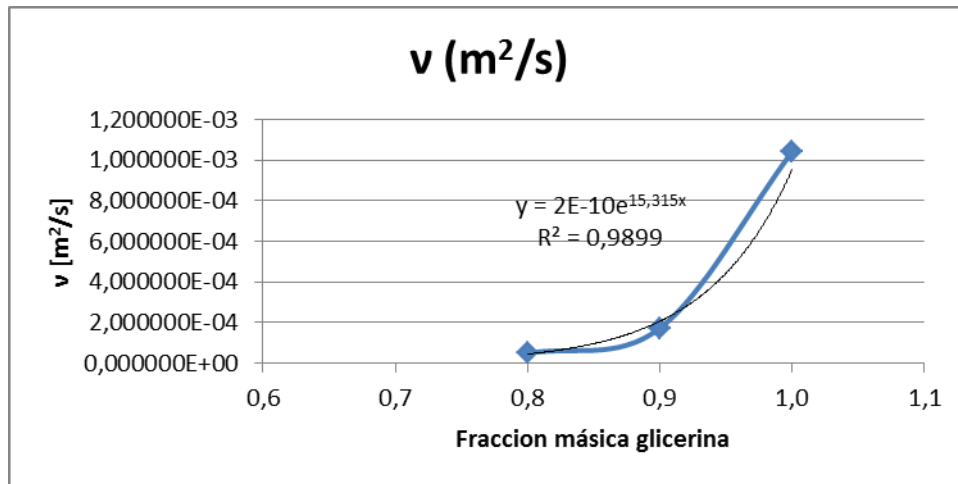


Ilustración 42 - Dependencia de la viscosidad cinemática frente a la composición de la mezcla (agua-glicerina).

Para sacar una composición final de trabajo se utilizó la media de los dos resultados intermedios de composición, ya que debería ser el mismo, y los mismos daban una composición similar. Consideramos pues como resultado una fracción másica de glicerina de 0,96425, que transformándolo a fracción volumétrica nos da un 0,9541 de glicerina y el resto de agua.

En la práctica se midieron 95 cl de glicerina y 50 ml de agua y se mezclaban hasta que se podía observar una fase homogénea.

ESTUDIOS COMPARATIVOS

Posteriormente a los ensayos que hemos hecho se pueden entrelazar parcialmente los estudios realizados con glicerina y mezclas, por tener unos caudales de alimentación similares, y con los ensayos de agua, aunque el caudal es ampliamente mayor en comparación con los otros dos.

Tendremos pues diferentes tipos de comparaciones, para empezar dispondremos los diferentes resultados óptimos para cada uno de los fluidos estudiados con las diferentes tapas utilizadas para los mismos, los resultados los representamos en esta tabla en forma de diámetros de gota [μm]:

	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18
Agua	13,27	-	-	9,77	-	-	15,31
Mezcla	-	7,4	8,35	6,66	7,95	-	-
Glicerina	-	9,21	7,38	7,58	7,33	8,99	-

Tabla 7 - Resultados de tamaños de gota con distintas tapas y diferentes líquidos.

Como podemos ver, hay ensayos que no han sido realizados, en el caso de los mayores diámetros con mezcla glicerina-agua o con glicerina solo, así como en los diámetros intermedios con agua. Esto ha sido debido que al comienzo del estudio se pretendía ver el comportamiento general del dispositivo y una vez que supiéramos que esperar del mismo, concretar el comportamiento del mismo para diferentes montajes, dentro de los estudios de líquidos de viscosidad alta.

Si representamos pues los resultados en una misma gráfica obtendremos:

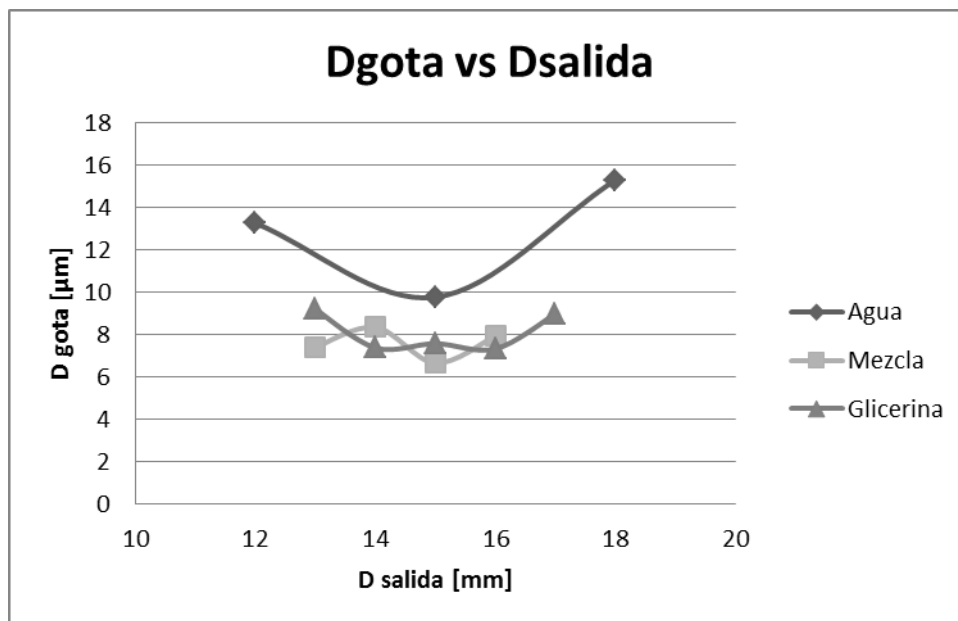


Ilustración 43 - Comparación para distintos líquidos de los tamaños de gota frente al diámetro de salida.

Podemos ver que ya en agua, con mezcla o con glicerina se tiene una tendencia a que en las proximidades del diámetro de salida de 15 mm se dé un mínimo, aunque se puede observar un comportamiento curioso con los líquidos de alta viscosidad.

En relación con esto, tendremos un comportamiento inesperado, debido principalmente a la diferencia de viscosidad de los líquidos tratados. Si observamos la influencia del diámetro de salida en el caudal tratado por el dispositivo, esperamos un comportamiento similar para los distintos líquidos pero nos encontramos con lo siguiente:

Diámetro [mm]	Q mezcla [l/h]	Q glic [l/h]
13	1,7689	0,984
14	1,8754	0,9979
15	1,9425	0,659
16	2,3122	0,8396
17	-	0,504

Tabla 8 - Relación entre diámetro de salida y caudales de líquido nebulizado.

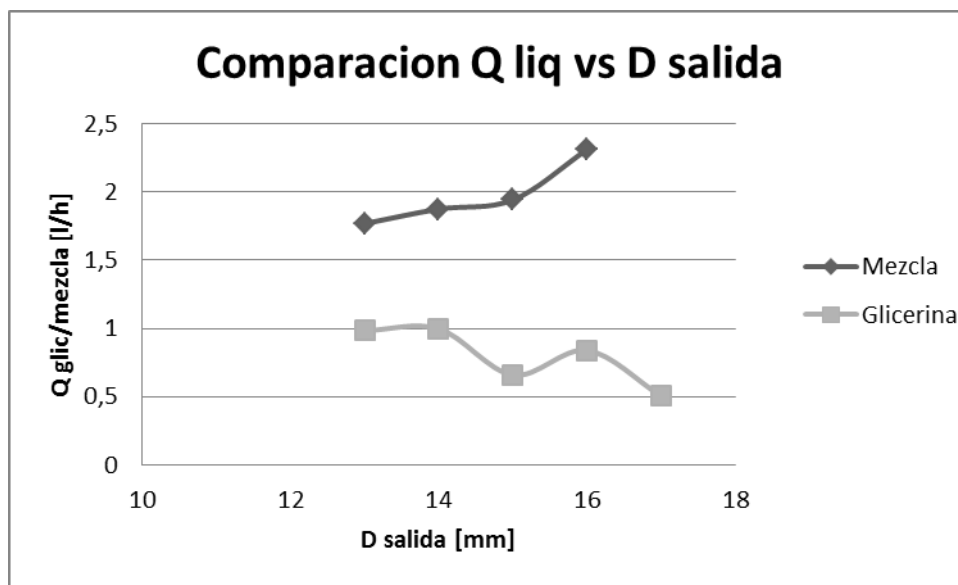


Ilustración 44 - Comparación de líquidos de alta viscosidad en función del comportamiento de el Qliq al Dsalida de la tapa.

Podemos ver que para la mezcla de glicerina y agua el caudal que se trata aumenta a medida que aumenta el diámetro de salida, pero que para la glicerina disminuye a medida que aumenta el diámetro de salida.

Por una parte el aumento del diámetro de la tapa de salida disminuye la pérdida de carga para el gas lo que facilita también la salida de líquido, por otra la depresión disminuye con el aumento del diámetro y se empeora la succión. Posiblemente, el resultado final es un equilibrio entre estos dos fenómenos y dependiendo de la viscosidad del líquido el comportamiento es diferente.

Otro aspecto a destacar del estudio realizado es el comportamiento del sistema de alimentación, ya que, debido a las instalaciones, solo podíamos tener control sobre el caudal de agua, aunque más adelante se modificó la altura del depósito de alimentación para variar la misma.

De este modo podemos concretar los valores de caudal de alimentación en una tabla con condiciones de operación similares, sea este el caudal de aire o el diámetro del orificio de salida:

Q aire [Nm ³ /h]	10	12	14	16	18	20	22	24
Q glicerina [l/h]	0,312	0,3065	0,363	0,323	0,45377	0,588	0,659	0,9208
Q mezcla [l/h]	0,881	0,8826	1,102	1,104	1,1897	1,5384	2,172	2,3122
Q agua [l/h]	79	79,34	81,82	86,46	90,4	99,37	104,41	112,05

Tabla 9 - Relación de caudales de líquido tratados por el nebulizador a distintos caudales de aire y diferentes líquidos

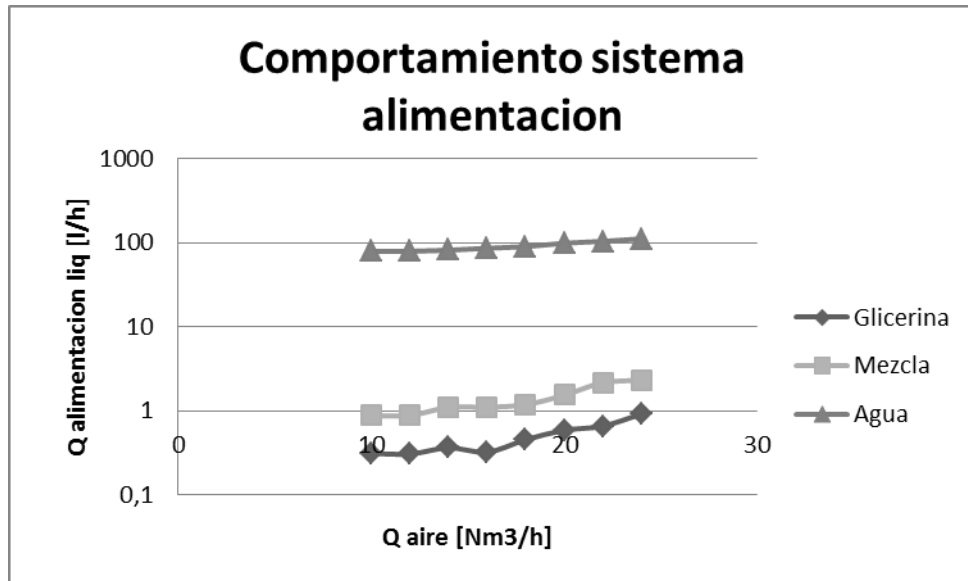


Ilustración 45 - Respuesta del caudal de líquido tratado por el dispositivo en función al Qaire introducido al mismo.

Como podemos ver, los caudales de glicerina y de mezcla proporcionados por la diferencia de cotas y por la succión del dispositivo tiene una gran influencia por la viscosidad del líquido que se pretenda nebulizar, ya que cuanto mayor viscosidad, más pérdidas de carga se darán en el sistema de alimentación y más dificultad tendrá el dispositivo para nebulizar el líquido presente en este.

Anteriormente hemos observado la dependencia del tamaño de gota con el caudal de aire proporcionado y la variación de este comportamiento a medida que variábamos el caudal de alimentación de agua para un diámetro de salida determinado. Si fijamos el montaje del dispositivo, con un único diámetro de salida y observamos el comportamiento del mismo con diferentes líquidos de viscosidades variadas, el tamaño de gota que nos proporcionará no variará en gran medida, salvo las esperables por variación de viscosidad. De esta manera podemos observarlo en este gráfico:

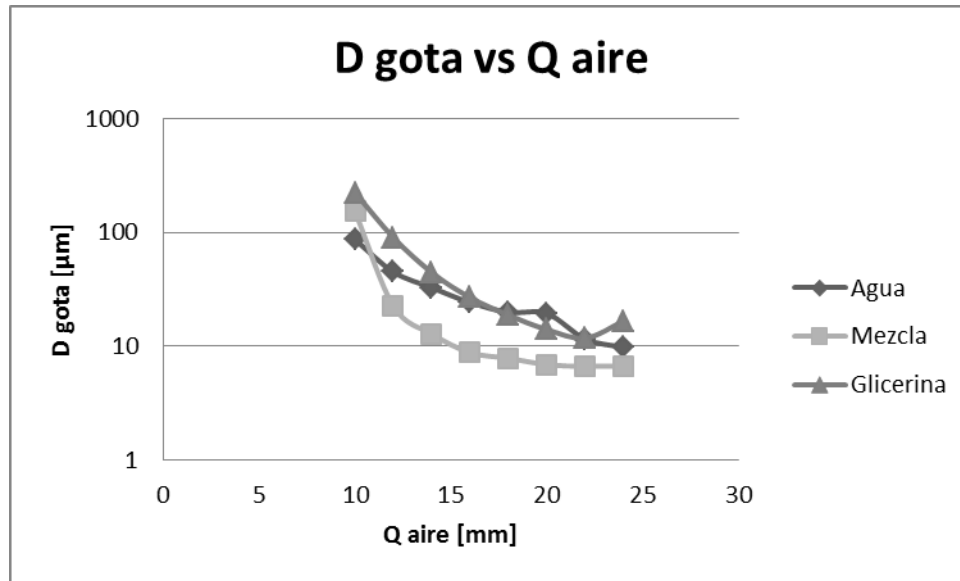


Ilustración 46 - Comparación de diferentes fluidos según la respuesta de Dgota frente a diferentes Qaire

De la gráfica anterior podemos observar que aunque variamos considerablemente la viscosidad de los líquidos alimentados al nebulizador, la respuesta del mismo en cuanto a la calidad de la nebulización es poco dependiente de la viscosidad del líquido alimentado.

Por lo que hemos observado el comportamiento del mismo al tratar líquidos de viscosidad elevada, solo limitara al caudal que el dispositivo puede tratar de los mismos, pues los tamaños de gota generados por el mismo son similares independientemente de la viscosidad del líquido. Por lo que podemos deducir que el funcionamiento de la geometría de nuestro modelo está delimitado por un tamaño de gota el cual no podrá reducir aunque se aumente el caudal de alimentación de aire del mismo.

Por último, dentro de los estudios comparativos del dispositivo, observaremos un comportamiento del dispositivo en función de la viscosidad del líquido alimentado a este. Para esto definiremos la relación entre el caudal que el dispositivo trata de líquido partido del caudal suministrado de aire para que el mismo funcione, dispondremos de esta manera de esta tabla:

Qaire [lN/h]	Qmix/Qa [-]	Qglic/Qa [-]	Qw/Qa [-]
10000	1,4030E-04	3,1200E-05	6,0000E-03
12000	7,6333E-05	2,5542E-05	5,0000E-03
14000	8,3500E-05	2,5929E-05	4,2857E-03
16000	7,0375E-05	2,0188E-05	3,7500E-03
18000	7,7389E-05	2,5209E-05	3,3333E-03
20000	7,7900E-05	2,9400E-05	3,0000E-03
22000	8,8295E-05	2,9955E-05	2,7273E-03
24000	9,1554E-05	3,8367E-05	2,5000E-03

Tabla 10 - Relación entre el caudal de aire y la relación Qliq/Qaire

Representando el caudal de aire con la relación de caudales gráficamente tendremos:

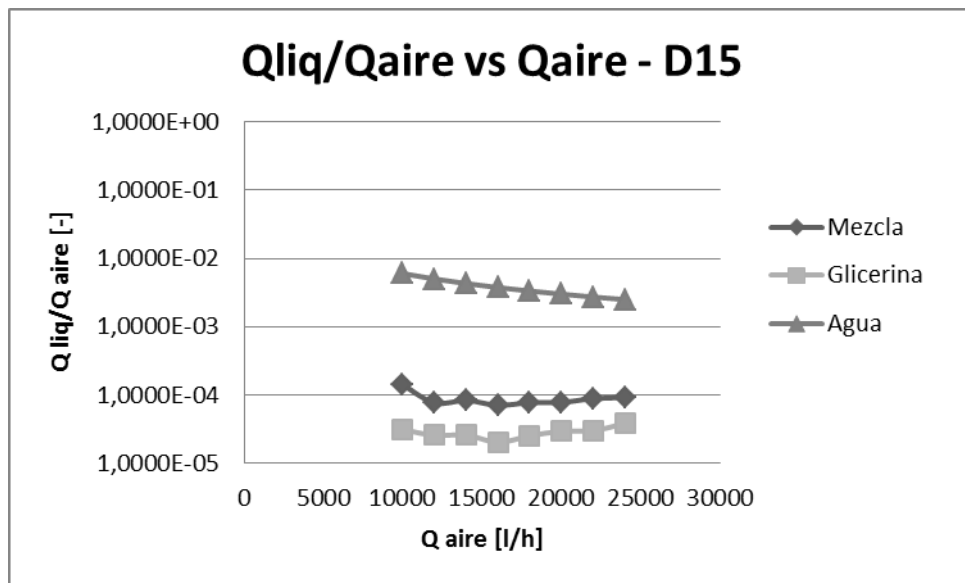


Ilustración 47 - Comportamiento de diferentes líquidos para la relación entre el cociente Q_{liq}/Q_{aire} frente a Q_{aire} .

Podemos observar tanto en la tabla como en la gráfica que el comportamiento a medida que aumentamos el caudal de aire dependerá de la naturaleza del líquido, puesto que para los líquidos de viscosidad alta aumenta, pero para el agua, de viscosidad baja disminuye. Lo que nos proporcionará una variación notable en el comportamiento por esta diferencia de caudal.

CONCLUSIONES:

El estudio realizado sobre el dispositivo nos ha proporcionado información sobre el comportamiento del mismo con líquidos de diferentes viscosidades, así como el correcto funcionamiento de este con líquidos de alta viscosidad como la glicerina, e intermedia con las mezclas glicerina-agua, para los cuales aún no se habían tenido resultados.

En el comportamiento respecto a los fluidos podemos concluir que hay ciertos comportamientos en los que no parece haber dependencia de la viscosidad, como que a medida que aumentamos el caudal de aire, aumenta el caudal a tratar de líquido o que el diámetro de gota generado por el dispositivo disminuye. También se insinúa un mínimo de tamaños de gota en el diámetro de salida de 15 mm.

Un comportamiento que merece la pena destacar, y que se ha comentado anteriormente es que la viscosidad de los líquidos en el dispositivo influye en mayor medida en el caudal de tratamiento del dispositivo que en la calidad de la nebulización, ya que en la eficacia de la nebulización, los diámetros de gota están en el mismo orden o no se diferencian en más de un orden de magnitud, sin embargo en el caudal de líquido la diferencia es de dos órdenes de magnitud.

También hay ciertos comportamientos del nebulizador que corresponden a una variación de viscosidad, ya que el funcionamiento del mismo cambia significativamente. Estos casos se dan al variar el diámetro de salida del nebulizador, el caudal consumido por el mismo de mezcla o de glicerina, aumenta y disminuye respectivamente. Asimismo, el cociente de Q_{liq}/Q_{aire} también presentara diferentes comportamientos frente al caudal de aire dependiendo de la viscosidad del líquido que trate el dispositivo.

Estos dos comportamientos responden a la dinámica del líquido dentro del dispositivo y a la influencia de la viscosidad en la dinámica del mismo, temas que no alcanza a abarcar el alcance del presente proyecto.

TRABAJO FUTURO:

Enfoque hacia la dinámica interior de los fluidos mediante el estudio de trazas para comprobar los comportamientos extraños al variar la viscosidad de los líquidos alimentados al dispositivo.

Se prevé también el ensayo con líquidos de mayor viscosidad y de otros no-Newtonianos.

Una caracterización de la estructura y cinemática del aerosol generado por estos dispositivos se está empezando a abordar con la ayuda de un equipo PDA (Phase Doppler Anemometer) que permitirá la medida de dos componentes de la velocidad de las gotas y el diámetro de estas.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] A. M. Gañán-Calvo (1998). Generation of steady liquid microthreads and micron-sized monodisperse sprays in gas streams. *Phys. Rev. Letter*, 80, 285, 1998.[Online] . Disponible en http://prl.aps.org/abstract/PRL/v80/i2/p285_1.
- [2] B. Almagro Fernández (Mayo 2008). Desarrollo de nebulizadores neumáticos basados en la tecnología Flow Focusing y Flow Blurring para su uso en técnicas analíticas basadas en plasma de acoplamiento inductivo. [Online]. Disponible en http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/11457/1/Tesis_Almagro.pdf.
- [3] SGITT-OTRI, Universidad de Alicante (2007). Nebulizador de alta eficiencia para introducir muestras en aplicaciones de plasma [Online]. Disponible en <http://sgitt-otri.ua.es/es/empresa/documentos/nebulizador.pdf>.
- [4] G. Grindlay Lledó (Febrero 2003). Aplicación de las microondas a la desolvatación de soluciones orgánicas en ICP-AES. [Online]. Disponible en <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/13422>.
- [5] L. Bayvel, Z. Orzechowsky (1993). Liquid Atomization.
- [6] O.Rojas G., *Introducción a la reología*, S520-B Apuntes de clase, Universidad de los Andes, Escuela de Ingeniería Química, 1999. [Online]. Disponible en <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S520B.pdf>.
- [7] D.S. Viswanath, T.K. Ghosh, D.H.L. Prasad, N.V. K. Dutt, K.Y.Rani, (2007). Viscosity of liquids. Theory, Estimation, Experiment, and Dat). [Online]. Disponible en <http://www.springer.com/materials/mechanics/book/978-1-4020-5481-5>.
- [8] J. Rosell-Llompart, A. M. Gañan Calvo (Marzo 2008). Turbulence in pneumatic flow focusing and flow blurring regimes. *Physical Review*. [Online] Vol. 77, 036321. Disponible en <http://pre.aps.org.focus.lib.kth.se/abstract/PRE/v77/i3/e036321>.

- [9] M. Frías, M. P. De Luxan y M. I. Sanchez de Rojas (Septiembre 1988). Espectometría de difracción por rayos láser. [Online]. Disponible en <http://digital.csic.es/handle/10261/39545>
- [10] A. Ettiernot y H. Ferrazzini. Análisis para determinar la calidad de una aeroaplicación. [Online]. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/dgss\[10\]/divanalisisdiagnostico/documentosDAYD/ANALISIS_DETERM_CALIDAD_AEROAPL.pdf](http://www.mgap.gub.uy/dgss[10]/divanalisisdiagnostico/documentosDAYD/ANALISIS_DETERM_CALIDAD_AEROAPL.pdf).
- [11] Proyecto de fin de carrera, Alberto Blasco Sanz, “Diseño de nebulizador para aceite tipo vórtice”, realizado en la universidad de Zaragoza en Mayo del 2012.
- [12] Tesis doctoral, José Luis Santolaya Sáenz, “Estudio experimental del spray de aceite usado generado por un atomizador de presión con rotación”, realizado en la Universidad de Zaragoza en Marzo de 2004.

INDICES:

Índice de ilustraciones:

Ilustración 1 - Esquema de un nebulizador neumático concéntrico convencional.	3
Ilustración 2 - Esquema de un nebulizador neumático de alta presión. Los números hacen referencia a: 1.Tubo de entrada de gas, 2.tubo de aporte de la muestra, 3. Rosca metálica superior, 4. Cuerpo metálico central, 5. Rosca metálica inferior, 6. Capilar de plástico, 7. Pieza de teflón, 8. Boquilla de vidrio	4
Ilustración 3 - Esquema de un nebulizador neumático de flujo cruzado.....	5
Ilustración 4 - Esquema de un nebulizador neumático Babington.	5
Ilustración 5 - Esquema de un nebulizador neumático de surco V.....	6
Ilustración 6 - Esquema de un nebulizador neumático cónico de tipo: (a) Cónico de Sharp, (b) Cónico lineal, (c) Cónico de Perkin Elmer.....	6
Ilustración 7 - Esquema de un nebulizador neumático de vidrio fritado.....	7
Ilustración 8- Esquema de un nebulizador neumático de rejilla.....	8
Ilustración 9 - Esquema de un nebulizador neumático de Flujo paralelo mejorado.	8
Ilustración 10 - Esquema de los procesos que sufre la muestra durante su paso por el nebulizador térmico.	9
Ilustración 11 - Nebulizador hidráulico de alta presión.	9
Ilustración 12 - Esquema de un nebulizador ultrasónico junto con su sistema de desolvatación.	10
Ilustración 13. - Esquema de un nebulizador electrostático.....	11
Ilustración 14 - Esquema de un nebulizador neumático rotatorio.	11
Ilustración 15 - Detalle de la campana extractora (parte inferior) recubierta con un plástico para evitar fugas de niebla.....	14
Ilustración 16 - Detalle del compresor de las instalaciones del CSIC, y sistema de control del mismo.....	15
Ilustración 17 - Detalle del rotámetro utilizado para la medición de caudal de aire y manómetros a la salida del mismo.	15
Ilustración 18 - Detalle del rotámetro de agua utilizado en los ensayos de agua y el deposito superior con mezclas y glicerina.	16
Ilustración 19 - Montaje del depósito de alimentación respecto del nebulizador.	16

Ilustración 20 - Diferentes detalles y partes del cabezal nebulizador, incluyendo el cuerpo, la tapa inferior y la tapa superior.....	17
Ilustración 21 - Configuración básica del difractorómetro Malvern Spraytec	20
Ilustración 22 - Variación de presión atm-cámara de nebulización con el dtapa óptimo.	24
Ilustración 23 - Variación de presión atm-cámara de nebulización con el dtapa óptimo.	24
Ilustración 24 - Representación de tamaños de gota frente al caudal de aire con diferentes series de caudal de agua.	25
Ilustración 25 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractorómetro, muestreo vertical.....	26
Ilustración 26 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractorómetro, muestreo horizontal.	26
Ilustración 27 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractorómetro, muestreo horizontal.	27
Ilustración 28 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractorómetro, muestreos horizontales a dos alturas.....	28
Ilustración 29 - Dependencia del tamaño de gota respecto a la posición de medida del difractorómetro, muestreo vertical.....	28
Ilustración 30 - Medidas de tamaños de gota dependiendo del Qaire y D _{tapa} de 15mm a "0" mm de la salida del nebulizador.	29
Ilustración 31 - Medidas de tamaños de gota dependiendo del Qaire y D _{tapa} de 15mm a "40" mm de la salida del nebulizador.	30
Ilustración 32 - Medidas de tamaños de gota dependiendo del Qaire y D _{tapa} de 15mm a "80" mm de la salida del nebulizador.	30
Ilustración 33 - Relación de resultados óptimos de D gota frente al diámetro de tapa de salida.	31
Ilustración 34 - Relación de resultados óptimos de Q glicerina frente al diámetro de tapa de salida.	32
Ilustración 35 – Relación entre el diámetro de gota y el caudal de aire alimentado al dispositivo para la tapa de 15mm.	33
Ilustración 36 - Relación de resultados óptimos de D gota frente al diámetro de tapa de salida.	33
Ilustración 37 - Relación de resultados óptimos de Q mezcla frente al diámetro de tapa de salida.	34

Ilustración 38 - Relación entre el Dgota y la altura del depósito de alimentación.	35
Ilustración 39 - Dependencia del caudal de alimentación de mezcla con la altura a la que se presentaba el depósito.	35
Ilustración 40 - Resultados óptimos para dgotas al variar la alimentación de mezcla agua-glicerina.	36
Ilustración 41 - Dependencia de la viscosidad dinámica frente a la composición de la mezcla (agua-glicerina).....	36
Ilustración 42 - Dependencia de la viscosidad cinemática frente a la composición de la mezcla (agua-glicerina).....	37
Ilustración 43 - Comparación para distintos líquidos de los tamaños de gota frente al diámetro de salida.	38
Ilustración 44 - Comparación de líquidos de alta viscosidad en función del comportamiento de el Qliq al Dsalida de la tapa.	39
Ilustración 45 - Respuesta del caudal de líquido tratado por el dispositivo en función al Qaire introducido al mismo.	40
Ilustración 46 - Comparación de diferentes fluidos según la respuesta de Dgotas frente a diferentes Qaire	41
Ilustración 47 - Comportamiento de diferentes líquidos para la relación entre el cociente Qliq/Qaire frente a Qaire.	42

Índice de tablas:

Tabla 1 - Variaciones de presión atmósfera-cámara de nebulización de diferentes montajes cuerpo-tapa de salida para cono alto.	23
Tabla 2 - Variaciones de presión atmósfera-cámara de nebulización de diferentes montajes cuerpo-tapa de salida para cono bajo.....	23
Tabla 3 - Tamaños de gota para diferentes caudales de agua y de aire con el montaje seleccionado.....	25
Tabla 4 - Resultados óptimos con glicerina.....	31
Tabla 5 - Resultados óptimos para mezclas.	33
Tabla 6 - Resultados de tamaños de gota a diferentes caudales de mezcla.....	34
Tabla 7 - Resultados de tamaños de gota con distintas tapas y diferentes líquidos.	38
Tabla 8 - Relación entre diámetro de salida y caudales de líquido nebulizado.	39

Tabla 9 - Relación de caudales de líquido tratados por el nebulizador a distintos caudales de aire y diferentes líquidos.....	40
---	----

Tabla 10 - Relación entre el caudal de aire y la relación Q_{liq}/Q_{aire}	41
--	----